

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA
COMPUTAÇÃO

TIAGO TERRA

**APLICAÇÃO DE LÓGICA FUZZY NO CONTROLE
DE TRÂNSITO URBANO**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação

Orientador: Prof. Paulo S. S. Borges, Dr.

Florianópolis, Dezembro de 2002

APLICAÇÃO DE LÓGICA FUZZY NO CONTROLE DE TRÂNSITO URBANO

TIAGO TERRA

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação. Área de Concentração Sistemas de Conhecimento, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Ciência da Computação.

Professor Paulo Sérgio da Silva Borges, Dr.
(Orientador)

Professor Fernando Álvaro Ostuni Gauthier, Dr.
(Coordenador do Curso)

Banca Examinadora

Professor Paulo Sérgio da Silva Borges, Dr.

Professor Luiz Fernando J. Maia, Dr.

Professor Mauro Roisenberg, Dr.

Professora Lúcia Helena M. Pacheco, Dra.

Dedico este trabalho a meus pais, Renato e Clair, à minha avó Elsa e a toda a minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Paulo S. S. Borges pelos ensinamentos, críticas, discussões, incentivo e motivação. Agradeço a ele por colaborar muito para que este trabalho se concretiza-se, além de que a sua pessoa colaborou muito para o meu crescimento e amadurecimento profissional e pessoal.

Agradeço aos meus amigos, especialmente ao meu colega de mestrado Anderson Bittencourt, pelas dicas, críticas, sugestões, que muito agregaram a esta dissertação.

Agradeço também aos meus professores de graduação, Eliseu Kotlinski e Manoel Reibold Peres, pelo grande incentivo que deram a mim no sentido de ingressar neste mestrado.

Por fim, gostaria de agradecer a toda a minha família, meus pais Renato e Clair, minha irmã Bianca, minha namorada Elisa e a todos aqueles que de alguma forma auxiliaram na concretização desta dissertação, sendo que sem eles, tal tarefa se tornaria ainda mais difícil.

ÍNDICE

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	xi
Resumo	xii
Abstract	xiii
1. Introdução	1
2. Sistema de Controle de Trânsito	
2.1 Introdução	4
2.2 Relevância do Controle de Tráfego	4
2.3 Terminologia Empregada	7
2.4 Classificação dos Controles de Trânsito	9
2.4.1 Interseções Sinalizadas	9
2.4.2 Interseções Não Sinalizadas	10
2.5 Tipos de Controles de Interseções Isoladas	11
2.5.1 Sistema de Controle de Interseções de Tempo Fixo	11
2.5.2 Sistema de Controle de Interseções de Tempo	11
Variável	
2.6 Definição das Variáveis de Controle de Trânsito	12
2.7 Conclusão	16
3. Elementos de Controle de Transito	
3.1 Introdução	17
3.2 Conceituação de Fila	17
3.3 Temporização de Sinais Isolados	21
3.4 Determinação do Atraso em Interseções Isoladas	24
3.5 Conclusão	25

4. Lógica *Fuzzy*

4.1	Introdução	26
4.2	Breve Histórico da Lógica <i>Fuzzy</i>	28
4.3	Controle <i>Fuzzy</i>	30
4.3.1	Introdução aos Conjuntos <i>Fuzzy</i>	30
4.3.2	Conceituação do Controle <i>Fuzzy</i>	32
4.4	<i>Fuzzificação</i> e Funções de Pertinência	33
4.5	Regras de Avaliação	37
4.6	<i>Defuzzificação</i>	39
4.6.1	Métodos de <i>Defuzzificação</i>	40
4.6.2	Mecanismos de Inferência	41
4.7	Conclusão	43

5. Modelo de Aplicação de Lógica *Fuzzy* em Controle de Trânsito

5.1	Introdução	44
5.2	Objetivos do Modelo de Controle <i>Fuzzy</i> para Trânsito	44
5.3	Protótipo de Controle de Trânsito Utilizando Lógica <i>Fuzzy</i>	46
5.3.1	Sistema 1	47
5.3.2	Sistema 2	55
5.3.3	Sistema 3	63
5.4	Conclusão	69

6. Resultados Obtidos em Simulação com Controle de Trânsito *Fuzzy*

6.1	Introdução	71
7.2	Objetivos e Métodos Empregados na Simulação	71
6.3	Análise de Resultados	72
6.3.1	Análise do Sistema 1	72
6.3.2	Análise do Sistema 2	77
6.3.3	Análise do Sistema 3	84
6.4	Conclusão	90

7. Conclusões

7.1	Introdução	92
7.2	Sumário da Dissertação	93
7.3	Conclusões Gerais	95
7.4	Trabalhos Futuros	96

8. Referências Bibliográficas	97
--------------------------------------	-----------

ANEXOS

ANEXO 1 – Dados de Análise para Sistema 2	100
A.1.1 Fluxo de Veículos do Sistema 1	100
A.1.2 Funções de Pertinência para Sistema 1	101
A.1.3 Funções de Pertinência para Sistema 1	102
ANEXO 2 - Dados de Análise para Sistema 2	103
A.2.1 Fluxo de Veículos do Sistema 2	103
A.2.2 Funções de Pertinência para Sistema 2	104
A.2.3 Funções de Pertinência para Sistema 2	105
ANEXO 3 - Dados de Análise para Sistema 3	106
A.3.1 Fluxo de Veículos do Sistema 3	106
A.3.2 Funções de Pertinência para Sistema 3	107
A.3.3 Funções de Pertinência para Sistema 3	108
ANEXO 4 – Interface com Usuário do PCFT	109

LISTA DE FIGURAS

Fig.2.1	- Ilustração de Via, Pista e Faixa	8
Fig.2.2	- Referencial para o calculo do <i>headway</i> médio (h)	13
Fig.2.3	- Tempo para cálculo de Ocupação (θ)	14
Fig.3.1	- Característica de um Volume de Tráfego Durante 24 Horas	18
Fig.3.2	- Semáforo com Conversão à Esquerda	19
Fig.3.3	- Diagrama Espaço-tempo do Movimento Numa Interseção	20
Fig.3.4	- Ciclo de um Semáforo	22
Fig.4.1	- Estrutura Básica de um Sistema Especialista	26
Fig.4.2	- Conjuntos <i>Fuzzy</i> para Sistema de Controle de Iluminação	30
Fig.4.3	- Controle <i>Fuzzy</i>	33
Fig.4.4	- Processo de <i>Fuzzificação</i>	34
Fig.4.5	- Conjuntos <i>Fuzzy</i> para Controle de Temperatura	34
Fig.4.6	- Descrição de um Gráfico <i>Fuzzy</i>	35
Fig.4.7	- Função Triângulo	36
Fig.4.8	- Função Trapezoidal	36
Fig.4.9	- Função Gaussiana	36
Fig.4.10	- Função Sino	37
Fig.4.11	- Função Sigmoidal	37
Fig.4.12	- Regras de Avaliação	38
Fig.4.13	- <i>Defuzzificação</i>	39
Fig.4.14	- Sistema <i>Fuzzy</i> ilustrando todos os passos para se chegar na saída precisa	39
Fig.4.15	- Definição de ponto de Máximo para <i>Defuzzificação</i>	40
Fig.4.16	- Definição de Media dos Máximos para <i>Defuzzificação</i>	41
Fig.4.17	- Definição de Centro de Gravidade para <i>Defuzzificação</i>	41
Fig.4.18	- Mecanismo de Inferência <i>Fuzzy</i> de Mamdani	43
Fig.5.1	- Sistema 1 de Controle de Trânsito com PCTF	48
Fig.5.2	- Característica de Fluxo de Veículos para Sistema 1	48
Fig.5.3	- Entradas e Saídas <i>Fuzzy</i> para o Sistema 1 com Sensor	49
Fig.5.4	- Entrada e Saídas <i>Fuzzy</i> para o Sistema 1 com Tempo Fixo	53
Fig.5.5	- Sistema 2 de Controle de Trânsito com PCTF	56
Fig.5.6	- Modo de Funcionamento dos Semáforos do Sistema 2	56

Fig.5.7	- Característica de Fluxo de Veículos para Sistema 2 para avenidas 1 e 2	57
Fig.5.8	- Característica de Fluxo de Veículos para Sistema 2 para avenidas 3 e 4	57
Fig.5.9	- Entradas e Saídas <i>Fuzzy</i> para o Sistema 2 com Sensor	58
Fig.5.10	- Sistema 3 de Controle de Trânsito com PCTF	63
Fig.5.11	- Característica de Fluxo de Veículos do Sistema 2	64
Fig.5.12	- Entradas e Saídas <i>Fuzzy</i> para o Sistema 3	65
Fig.5.13	- Entradas e Saídas <i>Fuzzy</i> para o Sistema 3 sem Sensor	68
Fig.6.1	- Análise de Fluxos q e s por Avenida do Sistema 1	78
Fig.6.2	- Gráfico Demonstrativo de Tempo de Verde para as Avenidas 1 e 3 do Sistema 1	75
Fig.6.3	- Gráfico Demonstrativo de Tempo de Verde para as Avenidas 2 e 4 do Sistema 1	75
Fig.6.4	- Gráfico Demonstrativo de Tempo de Verde para as Avenidas 1 e 3 do Sistema 1 com Tempo Fixo	76
Fig.6.5	- Gráfico Demonstrativo de Tempo de Verde para as Avenidas 2 e 4 do Sistema 1 com Tempo Fixo	77
Fig.6.6	- Gráfico Demonstrativo de Tempo de Verde para a Avenidas 1 do Sistema 2	80
Fig.6.7	- Gráfico Demonstrativo de Tempo de Verde para a Avenida 2 do Sistema2	80
Fig.6.8	- Gráfico Demonstrativo de Tempo de Verde para a Avenida 3 do Sistema2	80
Fig.6.9	- Gráfico Demonstrativo de Tempo de Verde para a Avenida 4 do Sistema2	81
Fig.6.10	- Gráfico Demonstrativo de Tempo de Verde para os Semáforos 1-5 do Sistema 2 com Tempo Fixo	82
Fig.6.11	- Gráfico Demonstrativo de Tempo de Verde para os Semáforos 3-7 do Sistema 2 com Tempo Fixo	83
Fig.6.12	- Gráfico Demonstrativo de Tempo de Verde para os Semáforos 2-6 do Sistema 2 com Tempo Fixo	83
Fig.6.13	- Gráfico Demonstrativo de Tempo de Verde para os Semáforos 4-8 do Sistema 2 com Tempo Fixo	83
Fig.6.14	- Gráfico Comparativo dos Tempos de Verde Entre o Sistema Existente e o Calculado pelo PCTF para o Sistema 3	86
Fig.6.15	- Gráfico Demonstrativo de Tempo de Verde para os Semáforos 1-2 do Sistema 3 com Sensor	87

Fig.6.16	- Gráfico Demonstrativo de Tempo de Verde para os Semáforos 3 do Sistema 3 com Sensor	87
Fig.6.17	- Gráfico Demonstrativo de Tempo de Verde para os Semáforos 1-2 do Sistema 3 com Sensor	89
Fig.6.18	- Gráfico Demonstrativo de Tempo de Verde para os Semáforos 1-2 do Sistema 3 com Sensor	90
Fig. A.1	- Funções de Pertinência de Entrada para a Avenida 1 do Sistema1	101
Fig. A.2	- Funções de Pertinência de Saída para a Avenida 1 do Sistema1	101
Fig. A.3	- Funções de Pertinência para Período do Dia para Controle com Tempo Fixo	102
Fig. A.4	- Funções de Pertinência para a Avenida 1 do Sistema1 com Tempo Fixo	102
Fig. A.5	- Funções de Pertinência de Entrada para a Avenida 1 e Avenida 2, Representando os Sensores 1 e 5 do do Sistema2	104
Fig. A.6	- Funções de Pertinência de Saída do Semáforo1 e 5 do Sistema 2	104
Fig. A.7	- Funções de Pertinência de Saída do Semáforo 1 e 5 do Sistema 2 com Tempo Fixo	105
Fig. A.8	- Funções de Pertinência de Entrada para a Av. Waldemar Pascoal do Sistema 3	107
Fig. A.9	-Funções de Pertinência de Saída para o Semáforo1-2 do Sistema3	107
Fig. A.10	- Função de Pertinência para o Período do Dia para Controle com Tempo Fixo	108
Fig. A.11	- Função de Pertinência de Saída para o Semáforo 1-2 do Sistema 3 com Tempo Fixo	108

LISTA DE TABELAS

Tab.4.1 - Comparação Geral entre Conhecimento Humano e Conhecimento Artificial.....	27
Tab.5.1 - Fluxo de Veículos para as Avenidas do Sistema 3.....	63
Tab.5.2 - Tempo de Verde e Ciclo Total das Avenidas do Sistema 3.....	54
Tab.6.1 - Verificação de Tempo de Verde para Semáforos do Sistema 1.....	73
Tab.6.2 - Verificação de Tempo de Verde para Semáforos do Sistema 1 (Tempo Fixo).....	76
Tab.6.3 - Verificação de Tempo de Verde para Semáforos do Sistema 2 (Com Sensor) para as Avenidas 1 e 2.....	78
Tab.6.4 - Verificação de Tempo de Verde para Semáforos do Sistema 2 (Com Sensor) para as Avenidas 3 e 4.....	78
Tab.6.5 - Somatório do Tempo de Verde e Ciclo Total para os Valores Analisados no Sistema 2.....	79
Tab.6.6 - Verificação de Tempo de Verde para Semáforos do Sistema 2 (Tempo Fixo) para as Avenidas 1 e 2.....	81
Tab.6.7 - Verificação de Tempo de Verde para Semáforos do Sistema 2 (Tempo Fixo) para as Avenidas 3 e 4.....	82
Tab.6.8 - Somatório do Tempo de Verde e Ciclo Total para os Valores Analisados no Sistema 2 com Tempo Fixo.....	82
Tab.6.9 - Verificação de Tempo de Verde para Semáforos do Sistema 3 (com Sensor).....	84
Tab.6.10 - Somatório do Tempo de Ciclo Total para os Valores Analisados no Sistema 3 com Sensor.....	85
Tab.6.11 - Verificação de Tempo de Verde para Semáforos do Sistema 3 (com Tempo Fixo).....	88
Tab.6.12 - Somatório do Tempo de Ciclo Total para os Valores Analisados no Sistema 3 com Tempo Fixo.....	89
Tab. A.1 - Fluxos de Veículos para Sistema 1.....	100
Tab. A.2 - Fluxo de Veículos para o Sistema 2.....	103
Tab. A.3 - Fluxo de Veículos para o Sistema 3.....	106

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma aplicação de um sistema de controle de tráfego urbano baseado em um modelo utilizando lógica *fuzzy*. As mudanças ocorridas em nossa sociedade nos últimos anos com o crescimento populacional e o aumento do número de veículos em vias públicas trouxeram problemas como o tráfego intenso e congestionamentos de trânsito. Diariamente perde-se muito tempo em cruzamentos e paradas, e há freqüentes acidentes em vias, trazendo não só prejuízos econômicos, mas também transtornos para o bem estar e para a qualidade de vida das pessoas. Nesta dissertação propõe-se uma contribuição visando amenizar esses inconvenientes. Para tal, a mesma vale-se da ciência da computação e de suas técnicas de inteligência artificial, introduzindo um sistema inteligente de controle de tráfego que melhore o fluxo de atendimento de veículos que concorrem em uma dada interseção, controlando o tempo de ciclo dos semáforos e baseando-se em sistemas atuais existentes de engenharia de tráfego.

ABSTRACT

This work presents the development of an application of a system of control of urban traffic based on a model of logical fuzzy. The changes in our society along the last years due to population growth and to the increase of the number of vehicles on public roads have brought problems like intense and slow traffic. Every day, people waste much time at intersection and set delays because of accidents, which result in economic losses and also in the decreasing standards of living. In this dissertation a contribution is proposed aiming at the minimization of that inconvenience. To achieve this objective, methods derived from Computer Science and Artificial Intelligence techniques are employed. An intelligent system for urban traffic control is introduced, which makes possible the improvement of the flow of vehicles at a given intersection, controlling the time cycles of the traffic lights according to present systems of traffic engineering.

Capítulo 1: INTRODUÇÃO

O uso de computadores, no início, foi dirigido para tarefas como cálculos numéricos e manipulação de grandes volumes de dados, ou seja, aplicações bem estruturadas e formalizadas, pois apresentavam maior velocidade e precisão que os humanos. Porém, quando a área de aplicação dos computadores se estendeu a tarefas de natureza simbólica, que para os humanos são de resolução natural, como a compreensão de linguagens naturais e imagens, planejamento, dedução ou a solução de problemas que apresentam complexidade exponencial, o desempenho dos computadores foi muito baixo, devido à grande complexidade para a compreensão dessas tarefas e a formulação de uma solução computacional. O objetivo passou a ser, então, facilitar isso tentando fazer uma máquina que fosse semelhante ao homem, capaz de pensar e agir intuitivamente. Esta busca ocorre até hoje, mas ainda estamos muito longe de ter um computador com tal capacidade.

Desde a década de oitenta, o uso de Inteligência Artificial constitui um dos setores de maior crescimento no mercado de tecnologia de informática. Podemos notar que o seu crescimento não é apenas maturação da tecnologia, mas também a demanda de *hardware*, *software* e recursos humanos de forma a criar uma infra-estrutura propícia ao desenvolvimento da área.

Existem vários pesquisadores que acreditam que a Inteligência Artificial (IA) é a chave para o *software* do futuro. As pesquisas neste sentido estão relacionadas a áreas de aplicação que envolve raciocínio humano, tentando imitá-lo e realizando inferências. Seu grande objetivo, como podemos verificar, é o contínuo aumento da “inteligência do computador”, pesquisando, para isso, os fenômenos de inteligência natural. Hoje a IA pode ser definida como sendo uma coleção de técnicas suportadas por um computador emulando algumas capacidades dos seres humanos.

As demandas de aplicação de IA são inúmeras, visto que, se levarmos em conta somente os problemas que estão ao nosso redor, já poderíamos possuir muitas pesquisas e muitos trabalhos para pesquisadores, sem falar no ramo industrial e comercial. No entanto, a inteligência artificial hoje depende de

alguns fatores para possuir novas descobertas, como o crescimento de cientistas envolvidos nas pesquisas e avanços, principalmente, nas áreas da ciência da computação, como a computação paralela.

Com isso, podemos dizer que a IA é uma grande ferramenta para a resolução de problemas na atualidade. Suas teorias e técnicas, muitas vezes, acabam facilitando aplicações que antes eram complexas. Dentro deste contexto, uma das facções da IA é o sistema especialista lógica *fuzzy*. Este surgiu em 1965 através do professor Lotfi A. Zadeh, com o objetivo de propor uma maneira de pensar diferente da lógica booleana (0 e 1). Os sistemas *fuzzy* procuram resolver problemas utilizando conjuntos *fuzzy* que proporcionam uma saída com valor real. Vale ressaltar que suas técnicas e teorias serão observadas mais tarde no decorrer do trabalho.

Nesta dissertação, teremos o objetivo de utilizar o sistema especialista de Inteligência Artificial desenvolvido por Zadeh (lógica *fuzzy*) para podermos resolver o problema de controle de trânsito existente hoje. Existem vários tipos de controle de trânsito em nosso meio, sendo alguns muito simples e outros sofisticados. Porém o problema do tráfego é muito mais antigo do que se imagina e a cada dia que passa, se torna ainda mais grave, sendo necessário possuir um sistema que seja fácil de se executar em qualquer situação. Um controle inteligente de trânsito poderia contemplar a identificação do fluxo de veículos em uma determinada interseção isolada para poder delimitar quais os tempos de ciclo dos semáforos necessários para cada momento (para funcionar vinte e quatro horas por dia, sete dias por semana) e assim facilitar os problemas de trânsito que hoje existem, como lentidão e engarrafamentos, melhorando a qualidade de vida das pessoas envolvidas neste processo. A lógica *fuzzy* pode tornar o desenvolvimento de projetos de controle de tráfego algo mais simples e ainda conseguir ser muito eficiente.

Com o objetivo de orientar a leitura desta dissertação, apresentamos a organização de seus capítulos:

- O Capítulo 1 é o que está sendo lido neste momento e é a introdução desta dissertação.
- O Capítulo 2 é a demonstração de uma síntese sobre o problema do controle de trânsito, comentando como que são encarados os

problemas desta natureza hoje, transmitindo-nos todas as circunstâncias do problema.

- No Capítulo 3 o tema “controle de trânsito” passa a ser mais técnico, nos dando alguns elementos que fazem parte do controle de tráfego urbano, como o problema das filas e do atraso de veículos, além de como são definidos os tempos de verde para uma dada interseção.
- O capítulo 4 é uma exposição teórica do sistema especialista lógica *fuzzy*, expondo sua estrutura, características, aplicabilidades e modo de controle.
- No capítulo 5 é caracterizado o protótipo de controle de trânsito com lógica *fuzzy*, o qual foi denominado PCFT (Protótipo de Controle *Fuzzy* de Trânsito), demonstrando quais os casos ou sistemas que foram analisados e como foram implementados as entradas e saídas *fuzzy* para se executar o controle.
- O capítulo 6 é onde se executa uma análise dos dados obtidos em simulação com o protótipo para controle de trânsito *fuzzy*.
- Por fim é realizada uma conclusão da dissertação demonstrando observações e considerações relevantes sobre os assuntos tratados.

Capítulo 2: TÓPICOS DE CONTROLE DE TRÂNSITO

2.1 Introdução

Este capítulo apresenta uma coletânea de assuntos relacionados ao controle de trânsito, tendo como objetivo principal a introdução a referida área, fazendo com que se estabeleça uma familiarização com o tema.

Dentro deste contexto, o capítulo iremos apresentar uma argumentação sobre a relevância do problema de controle de tráfego, caracterizando a terminologia empregada nesta área, para que possamos entender melhor os próximos capítulos; verificarmos a classificação dos tipos de controle de trânsito existentes; identificarmos algumas variáveis importantes para esta área, além de fazermos uma introdução a controle de trânsito em interseções isoladas.

2.2 Relevância do Controle de Tráfego

Os problemas de tráfego existentes hoje são conhecidos e estudados desde os tempos remotos, sendo sua causa básica o mau planejamento das cidades. Desde os tempos da Roma antiga se estudaram soluções para os problemas referentes ao trânsito urbano. Na Europa do século XVII, os congestionamentos levaram à proibição do estacionamento em certas áreas e à criação de vias de mão única. Com a Revolução Industrial, as máquinas motorizadas, como os trens e automóveis, invadiram os locais urbanos, aumentando o fluxo de trânsito. A problemática cresceu ainda mais com o aumento da velocidade de veículos e posteriormente sua quantidade.

Os problemas de tráfego começaram a se tornar objeto de grandes estudos a nível mundial, devido ao grande crescimento das cidades em todo o mundo. Dizemos hoje, que esta área de estudo se relaciona com questões sociais de grande relevância. Se levarmos em consideração o atraso a que são submetidos os condutores de veículos nas zonas urbanas, ficando parados em cruzamentos e vias, podemos dizer que existe um fator gerador de ineficácia econômica, além do desconforto e fadiga (física e mental) provocados,

resultando, para cada individuo envolvido, uma considerável perda percentual de sua capacidade produtiva diária.

Podemos observar que a eficiência do sistema de transportes é um dos pré-requisitos para o bem estar econômico e social de qualquer nação. Em todo o mundo, os bens de consumo, na sua maior parte, são produzidos em locais diferentes de seus centros consumidores. Também, as pessoas habitam distante de seus locais de trabalho, podendo ser identificadas infinitas necessidades de locomoção de pessoas, produtos e serviços, pois o transporte (como um todo) é uma parcela importante do custo de tudo aquilo que é produzido em um país.

Estudos sobre ruas e avenidas mais movimentadas, definindo o sentido destas, estudo de tempos de sinais de trânsito (semáforos), teorias envolvendo o tráfego urbano, projetos alternativos de vias públicas para facilitar o trânsito em meio urbano, são exemplos do que se faz hoje, com o intuito de diminuir as conseqüências do crescimento e da modernidade em evolução constante. No entanto, estes estudos são complexos, pois aquisição de dados para realizar um trabalho para melhorar um sistema viário são difíceis de acontecer devido à grande variabilidade dos sistemas analisados. No geral, estes dados se propõe a obter valores para volume de tráfego, velocidade, classificação dos veículos e espaçamento entre os mesmos.

Hoje, os sistemas de trânsito inteligentes são objeto de estudo em todo o mundo para servirem de ferramentas para o melhor controle de tráfego. Os dispositivos utilizados, individualmente ou integrando sistemas, ajudam os condutores a tomar decisões seguras e eficientes.

Existem quatro elementos básicos em um sistema de controle de tráfego.

- Computadores;
- Sistema de comunicação;
- Semáforos e equipamentos associados;
- Detectores de veículos;
- Placas de sinalização.

As informações sobre o fluxo são detectadas pelos equipamentos e transmitidas ao sistema computadorizado para processamento. A contagem de

veículos, sua classificação por tipo, assim como sua velocidade, podem ser enviadas ao computador principal. O computador, então, processa o fluxo de tráfego e assim pode determinar os tempos de semáforos que deverão ser aplicados.

Os controladores de tráfego também atuam na restrição do fluxo veicular. Assim como os controladores de tráfego podem aumentar a eficiência do movimento, eles também poderão ser usados para criar áreas de impedimento que restringem o tráfego em áreas sensíveis. Certamente são mais usados em cidades antigas, cujo sistema viário não suporta a demanda, e em zonas de restrição, formando barreiras que promovem o desvio da maior parte do fluxo para vias alternativas, criando áreas de menor densidade.

Sistemas para restrição de tráfego incluem também programas para priorizar pedestres ou diferentes tipos de veículos. Existem também equipamentos voltados a conter ou coibir a circulação de certos tipos de automóveis. Como exemplo podemos apontar a dificuldade de alguns municípios localizados próximos as rodovias com pedágios instalados que se transformam em rotas alternativas para o transporte de carga que, na tentativa de reduzir o custo, evitam os pedágios, circulando em áreas urbanas, complicando o fluxo local e danificando a malha viária do município. A instalação de equipamentos de monitoramento ou até mesmo registro fotográfico permitem o acompanhamento ou mesmo a imposição de sanções, conforme o caso.

Outras tecnologias podem ser consideradas como inovadoras no auxílio do controle de trânsito urbano. São elas:

- Sensor de monóxido de carbono: aciona e muda a direção de ventiladores para dispersar o gás tóxico.
- Fibra óptica: transmite dados para a central, inclusive estatísticas de fluxo de tráfego.
- Circuito fechado de câmaras de vídeo, dispostas em pontos estratégicos de ruas e avenidas, controlando o tráfego e problemas que venham ocorrer no trânsito.
- Painéis de mensagens: espalhados pela estrada, avisam sobre acidentes, neblina e congestionamentos.

- Pedágio eletrônico: debita automaticamente o valor cobrado na conta bancária do motorista.
- Veículos monitorados: um *chip* nos carros de socorro permite sua localização por satélites.

Contudo, podemos verificar que o assunto “controle de tráfego urbano” é muito atual e de grande importância para o nosso meio. Os sistemas de tráfego precisam de evolução constante para poder acompanhar o crescimento urbano das cidades e o conseqüente aumento no número de meios de transporte, tentando trazer organização a vias públicas, crescimento econômico da população, diminuição do tempo perdido em cruzamentos e engarrafamentos, melhorando sempre a qualidade de vida das pessoas. O assunto controle de tráfego urbano, como já mencionado, é objeto de estudo em todo o mundo, sendo que modelos e aplicações são desenvolvidos para sanear problemas em determinadas cidades. Devemos destacar algumas pesquisas atuais, como estudos de semáforos inteligentes e centralização de controle de trânsito.

2.3 Terminologia Empregada

Para melhor entendermos a terminologia utilizada neste trabalho e também na área de engenharia de tráfego, será demonstrada aqui os principais termos e suas definições com o objetivo de estabelecermos um padrão de comunicação. Serão descritos os termos, seu símbolo (se houver) e a sua definição([9], [12], [14], [15], [16]):

- **Veículos:** É objeto de engenharia de tráfego, podendo ser um automóvel de passeio, um ônibus, um caminhão, moto, etc.
- **Interseção/Cruzamento:** É o local onde duas ou mais ruas se cruzam
- **Movimento:** Refere-se ao deslocamento de automóveis em uma interseção, não necessariamente possuindo uma direção e sentido, mas tendo origem e destino.
- **Movimentos em Conflito:** Isto ocorre quando a trajetória formada por dois movimentos são concorrentes em um determinado cruzamento, sendo que representa um potencial para ocorrência de acidentes em interseções.

- **Vias:** É a distância total compreendida para movimentação de veículos (ver Fig. 2-1).
- **Pista:** É o espaço em uma via destinado a um sentido de movimento (ver Fig. 2-1).
- **Faixa:** Em uma pista, podem existir faixas que servem para organizar o trânsito (ver Fig. 2-1).

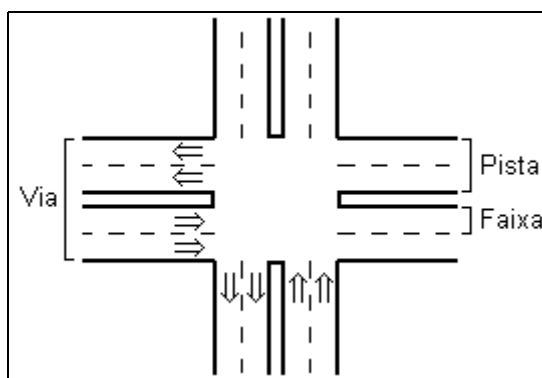


Fig. 2.1: Ilustração de Via, Pista e Faixa

- **Ciclo (C):** Refere-se ao tempo destinado para que todos os conjuntos de movimentos possam ser contemplados.
- **Fase:** É uma parte do ciclo que é destinada para um determinado conjunto de movimentos.
- **Semáforo:** Também podendo ser chamado de sinaleiro, é um dispositivo utilizado para sinalização de estradas, ruas e avenidas, geralmente em interseções. Geralmente é uma estrutura ou poste com um dispositivo eletro-eletrônico (luzes) ou mecânico (hastes metálicas).
- **Sinal Vermelho:** Também podendo ser chamado de tempo de vermelho, é o tempo durante o qual a luz vermelha do semáforo permanece acesa.
- **Sinal Amarelo (a):** Também podendo ser chamado de tempo de amarelo, é o tempo durante o qual a luz verde do semáforo permanece acesa.
- **Sinal Verde (k):** Também podendo ser chamado de “tempo de verde”, é o tempo durante o qual a luz verde do semáforo permanece acesa.
- **Atraso (d):** É a diferença entre o tempo movimento através da interseção e o tempo que seria gasto para um veículo percorrer o

mesmo percurso, sem que tivesse que para em um fila ou diminuir a velocidade por causa da interseção.

- **Atraso Total Médio (D):** É a média aritmética dos atrasos de todos os veículos que passam na interseção.
- **Start Time:** É o tempo médio perdido na arrancada dos veículos quando a luz verde é acionada.
- **Tempo de Verde Líquido:** É o tempo de verde subtraído do *start time* na fase considerada.
- **Tempo de Verde Efetivo (g):** É o definido como o tempo de verde somado ao tempo de amarelo e subtraído do tempo perdido na fase considerada.

Todos estes termos e serão voltados a ser levantados ou conceituados mais a fundo no decorrer deste trabalho, principalmente neste capítulo quanto no seguinte que trata a questão da determinação do tempo de espera em semáforos e o tamanho de filas.

2.4 Classificação dos Controles de Trânsito

Dentro dos sistemas de controle de trânsito e de engenharia de tráfego nós podemos estabelecer uma classificação, que facilitaram a compreensão do tema abordado.

Definimos hoje vários tipos de sistemas de controle de trânsito, existindo desde interseções não sinalizadas a interseções sinalizadas e com sistemas inteligentes. Podemos dizer que o tema principal aqui abordado é "cruzamentos isolados", sinalizados ou não, mas não devemos deixar de possuir uma maior visão sobre o foco controle de tráfego.

2.4.1 Interseções Sinalizadas

Podemos definir que interseções sinalizadas são aquelas nas quais a permissão de passagem é dada por semáforos de trânsito. Os movimentos são separados no tempo, evitando com que os conflitos ocorram simultaneamente, criando regras aos semáforos.

Estas interseções podem ser controladas de forma isolada (onde o tipo de controle sinalizado não é afetado por outras interseções em sua

vizinhança) ou não isolada, onde ocorre esta influencia, podendo ser de três formas:

- **Arterial:** O controle é feito de maneira a controlar várias interseções sinalizadas ao longo de uma avenida arterial, onde se objetiva promover o fluxo progressivo ao longo desta artéria.
- **Redes Fechadas:** O controle é feito de maneira que um grupo de interseções adjacentes são operadas de forma coordenadas.
- **Controle por Área:** É uma forma de controle de tráfego que centraliza os sinais de trânsito de uma cidade, tratando este como um grande sistema.

As interseções sinalizadas possuem como objetivo principal produzir o escoamento suave do fluxo de tráfego. A forma como isto vai ser implantado é de acordo com as circunstâncias do local onde vai ser realizado a sinalização.

2.4.2 Interseções Não Sinalizadas

Interseções não sinalizadas são aquelas em que o controle é realizado pelos próprios condutores dos veículos. Isto acontece devido a regras de trânsito já pré-estabelecidas e com interseções onde uma via principal recebe a prioridade de passagem, sendo que os veículos da via secundária aguardam até ocorrer um intervalo de tempo suficientemente seguro para passagem. Esta avenida secundária é controlada através de placas do tipo “PARE”.

As vantagens deste tipo interseções é que os veículos da via principal não sofrerão quase nenhum tipo de atraso, porém os veículos da via secundária acabam sofrendo atraso enquanto esperam por intervalo de tempo seguro para sua travessia.

O principal ponto negativo deste tipo de interseção, sem dúvida, é a falta de segurança nestas interseções. Interseções onde a visibilidade não é muito boa tornam isto ainda mais agravante. Por isto, podemos considerar que mesmo os veículos da via principal possuem um certo tipo de atraso, pois acabam reduzindo sua velocidade nas interseções, para assim diminuir as possibilidades de um eventual acidente.

2.5 Tipos de Controle de Interseções Isoladas

Dentro dos tipos de controle de interseções isoladas, nós podemos classificar em sistemas de controle de tempo fixo e de tempo variável. Cada sistema deve ser avaliado para ser implantado de acordo com a viabilidade do projeto de controle de trânsito. Não existe hoje um método que seja padrão para definir qual é o mais adequado para uma determinada interseção, porém é o estudo de caso que vai fornecer o que método mais adequado, pois cada sistema oferece um custo e um tipo de desempenho.

2.5.1 Sistema de Controle de Interseção de Tempo Fixo

Interseções com controle de tempo fixo atribuem o direito de passagem de acordo com o projeto realizado com base em observações anteriores das características de tráfego na interseção considerada. Seus parâmetros são pré-programados e atuam deste modo sem sofrer alterações, mesmo que o fluxo de tráfego altere durante o período do dia. Existem vários métodos para se calcular este tempo fixo para uma determinada interseção, que serão comentados neste trabalho no capítulo posterior.

Seu sistema é descrito basicamente por possuir um tempo fixo para cada período de verde, vermelho e amarelo, sendo que o tempo de ciclo total será sempre o mesmo, uma vez este fixado. Porém, podemos verificar também que, mesmo sendo fixo os tempos do semáforo, nada impede que existam várias programações, cada um com a demanda observada para cada instante diferente do dia. Estes sistemas também são considerados de tempo pré-fixados, porém possuem um sistema que de acordo com o horário do dia aciona um modelo mais adequado.

No geral, os sistemas pré temporizados são adequados para interseções cujas condições de tráfego são previsíveis ou para aquelas onde freqüentemente ocorrem condições de saturação.

2.5.2 Sistema de Controle de Interseção de Tempo Variável

Definiremos que interseções de tempo variável são aquelas em que o fluxo do tráfego é que determina quando uma fase inicia e termina o seu ciclo.

Isto é realizado por detectores instalados nas ruas que realimentam os controladores de tempo dos sinais.

A diferença entre os sistemas de controle realimentado está basicamente no tipo e na quantidade de informação sobre o estado do tráfego, pois estes dados é que forneceram a base para a tomada de decisões em relação ao tempo a ser aplicado. Para isto precisamos de um bom posicionamento e boa qualidade dos detectores a serem empregados (tipo adequado para cada caso), além do meio como estes dados serão manipulados (hardware e software). Podemos verificar três tipos de sensores empregados para exemplificar:

- **Detector de Pressão:** Consistem de chapas de contato revestida de borracha e montadas numa armação de aço, que por sua vez fica embutida no pavimento. Ao entrar em contato com a superfície do detector, a roda do veículo fecha o circuito, indicando a presença do mesmo ao sistema de controle.
- **Detector Magnético:** Consiste de uma simples bobina cilíndrica cujo circuito magnético da terra se fecha quando da passagem dos veículos sobre a sua zona de influência.
- **Detector de Radar:** Pode ser suspenso sobre o leito da via pública, evitando assim a escavação do pavimento. Ao se aproximar um veículo do campo de ação do radar, sua presença é assinalada no controle.

Existem outros tipos de detectores, como a utilização de câmeras, empregando aí técnicas de computação gráfica, conseguindo fornecer dados para o sistema controlador.

Um sistema com tempo variável pode ajustar os parâmetros de tempo de sinal verde, amarelo, vermelho, seqüência de fases e ciclo.

2.6 Definição das Variáveis de Controle de Trânsito

Para melhor compreensão dos elementos de controle de tráfego, é muito importante conhecermos suas variáveis de estado. Os tipos de variáveis que um controlador utiliza para determinar o estado do tráfego e, em seguida, produzir uma resposta de atuação sobre o mesmo, é um dos fatores

determinantes do desempenho do controlador. As variáveis mais usualmente utilizadas são ([9], [11], [12], [14] e [15]):

- **Presença de Veículo**

A presença ou ausência de um veículo em um dado ponto de uma via é definida como *presença*, podendo ser medidas por detectores de presença.

- **Fluxo ou Volume (q)**

É definido pela contagem do número de veículos que passam por um ponto de interesse (N) em determinado tempo (T). Com isso, aplica-se a equação.

$$q = \frac{N}{T} \quad \text{Eq. 2-1}$$

- **Headway (h_i)**

É o tempo que separa a passagem de pontos correspondentes, sendo que geralmente o pára-choque dianteiro de dois veículos consecutivos servem como referência. Mas o que realmente interessa como variável é o *headway* médio de uma via, que é dado por:

$$h = \frac{\sum_{i=1}^N h_i}{N} \quad \text{Eq. 2-2}$$

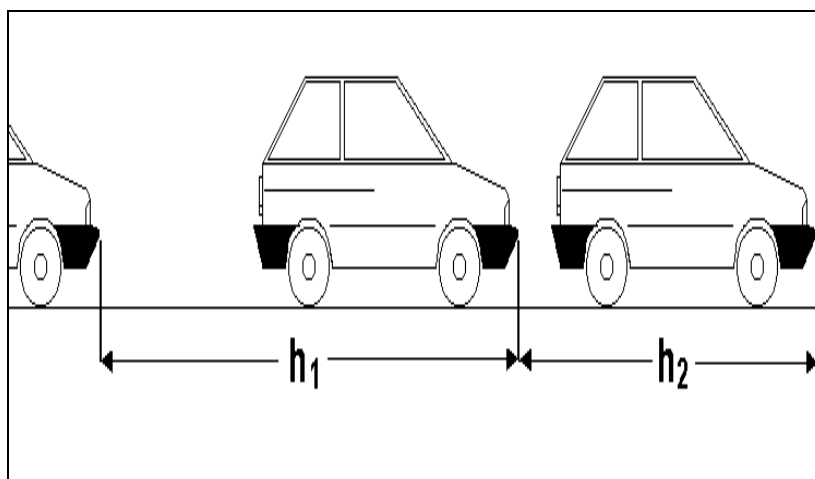


Fig. 2.2 – Referencial para o calculo do *headway* médio (h)

- **Ocupação (θ)**

É definida como a fração de tempo que um determinado ponto de uma via permanece ocupado por um veículo. Experimentalmente pode ser determinada por:

$$\theta = \frac{100}{T} \sum_{i=1}^N t_i \quad \text{Eq. 2-3}$$

Onde:

N = Número de veículos detectados durante o período de tempo T

t_i = Tempo durante o qual o i -ésimo veículo esteve presente no ponto considerado, conforme figura 2.3.

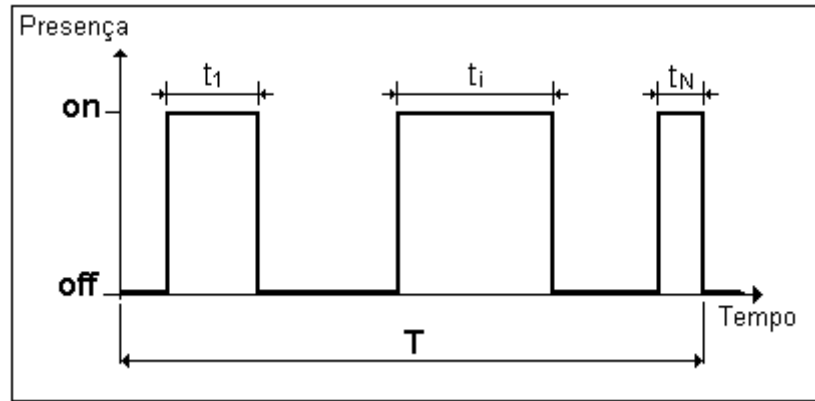


Fig. 2.3 – Tempo para cálculo de Ocupação (θ)

- **Velocidade**

Existem duas definições importantes de velocidades médias em engenharia de tráfego: a velocidade média temporal e a velocidade média espacial.

A velocidade média temporal (\bar{u}_t) corresponde à média aritmética das velocidades observadas de vários veículos num determinado ponto:

$$\bar{u}_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \quad \text{Eq. 2-4}$$

Onde:

N = Número de observações

U_i = Velocidade escalar do i -ésimo veículo no ponto considerado.

A velocidade média espacial ou velocidade média harmônica (\bar{u}_s) corresponde à média harmônica das velocidades observadas. Considere N veículos e suas respectivas velocidades observadas u_i em um ponto de uma via. A média aritmética dos tempos que cada veículo levaria para percorrer uma distância D seria dada por:

$$\bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{D}{u_i} \quad \text{Eq. 2-5}$$

A velocidade média espacial seria:

$$\bar{u}_s = \frac{D}{\bar{t}} = \frac{D}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{D}{u_i}} \quad \text{Eq. 2-6}$$

Se eliminarmos D da expressão 2-6, chega-se a equação 2-7, que mostra que a velocidade média espacial \bar{u}_s é a média harmônica das velocidades u_i :

$$\bar{u}_s = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{u_i}} \quad \text{Eq. 2-7}$$

Para obter a variável u_i usa-se como método os detectores de presença colocados no asfalto da via a ser analisada.

- **Densidade**

É o número de veículos por unidade de comprimento em uma via. Podemos definir uma densidade associada a um único veículo K_i e/ou uma densidade ao longo de um comprimento K . A densidade associada a um único veículo é definida como:

$$K_i = \frac{1}{s_i} \quad \text{Eq. 2-8}$$

Onde:

1 = Algarismo um, representando 1 veículo.

S_i = Representa o espaço ocupado pelo i -ésimo veículo, definido como a distância entre os extremos dianteiros do i -ésimo veículo e do seu antecessor.

A densidade ao longo de um comprimento é definida pela expressão 2-9, onde N é número de veículos contados ao longo da seção e L é o comprimento da seção ao longo da qual se deseja avaliar a densidade:

$$K = \frac{N}{L} \quad \text{Eq. 2-9}$$

- **Tamanho da Fila**

Este último trata do número de veículos parados atrás da linha de parada de um cruzamento. Este assunto tornaremos a abordar ainda mais no

capítulo seguinte, o qual tratará o problema das filas e do dimensionamento do tempo de ciclo dos semáforos.

Com tudo, possuímos conceitos importantes para falarmos de controle de tráfego. Estas variáveis são, na verdade, as mais utilizadas quando se fala de tráfego automatizado e possuem relevância importante em todas as bibliográficas encontradas. A importância destes valores faz com que engenheiros e pessoas que trabalham com projetos de controle de tráfego possam montar estratégias corretas para obter melhores resultados em suas aplicações. No capítulo seguinte será dada mais abordagem a estes assuntos aqui tratados.

2.7 Conclusão

Com este capítulo, o tema controle de tráfego foi abordado de maneira a introduzir uma visão geral sobre este assunto, sendo que isto proporciona uma melhor familiarização com a área de trânsito, o que nos traz um melhor entendimento dos próximos capítulos, os quais trataremos de controle de trânsito por um lado mais técnico.

A relevância do problema de controle de tráfego é, como relatado anteriormente, um problema antigo, e que vem sendo estudado a tempos. Por isto, hoje possuímos uma terminologia empregada definida, para o fim de possuímos uma mesma linguagem técnica.

Além disso, os estudos na área de controle de trânsito é muito vasto, como visto, existindo até controles automatizados. A classificação destes foi tratada no sentido de sabermos quais os tipos que existem atualmente. Também foi introduzido um estudo de interseções isoladas, que abordaremos novamente no capítulo seguinte.

Capítulo 3: DETERMINAÇÃO DE TEMPO DE ESPERA E TAMANHO DE FILA EM SEMÁFOROS

3.1 Introdução

Este capítulo tem por objetivo abordar assuntos que caracterizam tecnicamente um sistema de tráfego para uma interseção isolada. O conhecimento do estado do sistema a ser projetado é importante tanto para projetistas de tráfego, como também para os sistemas automatizados de controle de tráfego em geral. Para podermos determinar um sistema inteligente de controle de trânsito, é essencial termos conhecimento de como funciona os sistemas com semáforos, sendo preciso para isto sabermos seus termos técnicos empregados. Além disso, o tema essencial aqui abordado é no sentido de sabermos como realmente calcularmos os tempo de cada fase de um semáforo e a importância do atraso provocado por filas em interseções isoladas. O Capítulo anterior nos mostrou a importância de um controle de trânsito eficiente e é preciso agora caracterizar mais como são determinados os tempos de espera para condutores em filas que se formam em interseções.

Os assuntos neste capítulo tratados são no sentido de verificar a conceituação das filas, analisar como se estabelece o controle de ciclo de interseções isoladas, além de podermos determinar a temporização dos semáforos nestas interseções. Por fim, verifica-se também a definição da fórmula de Webster [10] para a questão do atraso de veículos.

3.2 Conceituação de Fila

Como já colocado no capítulo anterior, as filas fazem parte do dia-a-dia de condutores de veículos e merecem um levantamento bibliográfico para melhor entendermos seus conceitos.

Podemos caracterizar uma fila como sendo um processo de chegadas (de veículos, por exemplo) a um sistema de atendimento formado por uma ou mais unidades de serviços [18]. No caso de uma interseção isolada, entendemos que quando o semáforo está na fase vermelha, teremos uma

formação de uma fila, sendo esta fila o atendimento, enquanto que o serviço é a verificação de que o tempo de verde seja suficiente para atender todos os veículos que estão parados.

Em sistemas de trânsito, as chegadas de veículos são irregulares, isto é, a probabilidade de uma chegada em um intervalo é igual a probabilidade de uma chegada em qualquer outro intervalo de mesma duração [18]. Um exemplo disto é variação de volume de tráfego durante o período do dia, onde podem ser observadas horas de pico, conforme figura 3.1 representativa de uma interseção isolada.

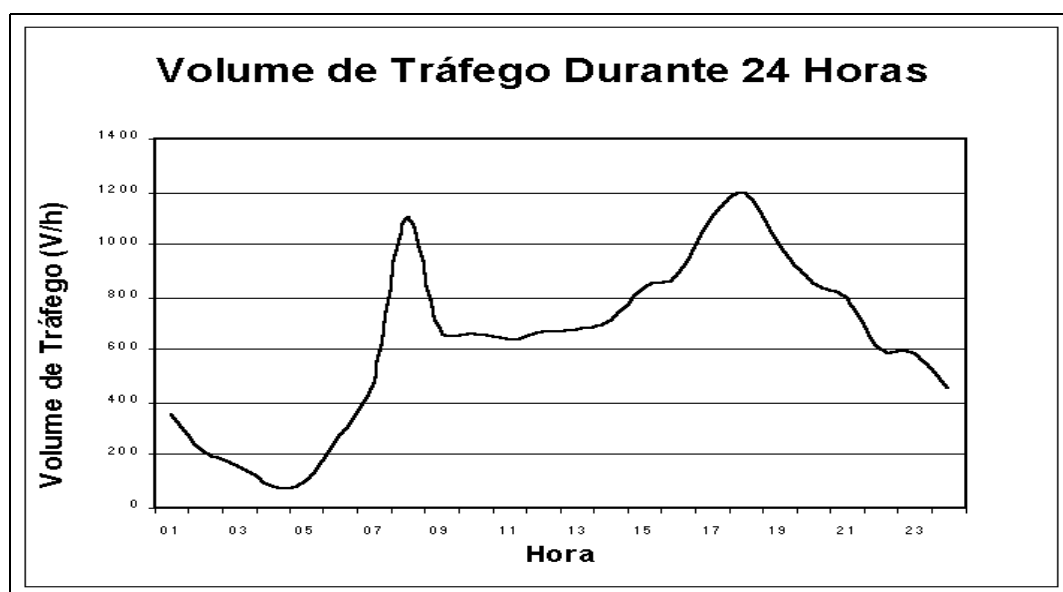


Fig. 3.1 – Característica de um Volume de Tráfego Durante 24 Horas

Diversos estudos têm sido realizados para caracterizar as filas em interseções isoladas. Em análises realizadas se concluiu que a distribuição de Poisson não é adequada para tráfegos intensos, de alta vazão, como nos períodos de pico, sendo que nestas condições, uma distribuição do tipo uniforme aproxima melhor o fluxo real ([12], [19]). O escoamento do tráfego, quando passa a ser forçado, deixa de apresentar as características básicas de independência de comportamento entre os veículos, condição essa fundamental à formação de um processo de Poisson. Porém existem outras distribuições propostas por outros autores para representar o fluxo real. Para isso, a expressão mais usada para definir o atraso de veículos em decorrência de uma fila em uma interseção com semáforo, é a de Webster [10], a qual trataremos ainda neste capítulo.

O objetivo que temos ao determinar um ciclo que devemos fixar para um semáforo é o de tornar o mínimo possível o tempo global de espera dos usuários em uma interseção (diminuir ao máximo o tempo do condutor em uma fila). Para dimensionarmos este ciclo é necessário obtermos, entre outras coisas, os volumes de tráfego em cada sentido para cada uma das vias que se interceptam naquele ponto. Como se sabe, o volume de tráfego pode variar no decorrer do dia e também no decorrer da semana, então este dado é conseguido através de uma média diária (tomando ao longo de um ano) por um volume médio dos períodos de pico.

Além disso, outros fatores interferem na capacidade de atendimento de um semáforo, pois este depende também da composição do tráfego, da geometria da interseção, das condições de conversão, etc. Para uma mesma duração da fase verde, a capacidade tende a ser maior quando é permitida a conversão à direita, conforme figura 3.2.

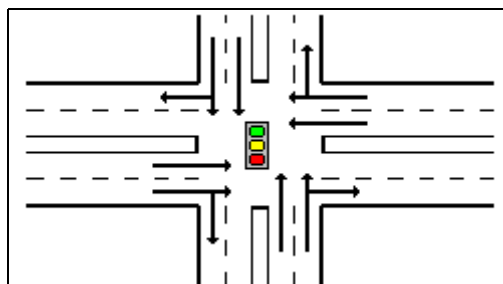


Fig. 3.2 – Semáforo com Conversão à Direita

A capacidade de atendimento diminui em uma interseção quando o raio de curvatura da trajetória é pequeno, obrigando uma sensível redução na velocidade. Um exemplo disto são ônibus e caminhões, que possuem comprimentos relativamente grandes e menor aceleração do que automóveis, fazendo com que gastem mais tempo para atravessar uma interseção. Todos estes parâmetros interferem diretamente na formação de filas e resultando em uma maior influências em relação a avaliação do atraso.

A figura a seguir (fig. 3.3), está representando um diagrama de espaço-tempo do escoamento do tráfego numa interseção com sinalização luminosa. Podemos verificar que no início os veículos estão em movimento e o semáforo está na fase verde. Logo após, observamos que na fase amarela um veículo passa por esta, representando o fim do tempo de passagem de veículos para este semáforo. No tempo da fase vermelha, ocorre a formação de uma fila,

sendo que no início da nova fase verde, esta fila está formada. Existem veículos que não enfrentam esta fila, não sofrendo assim nenhum tipo de atraso.

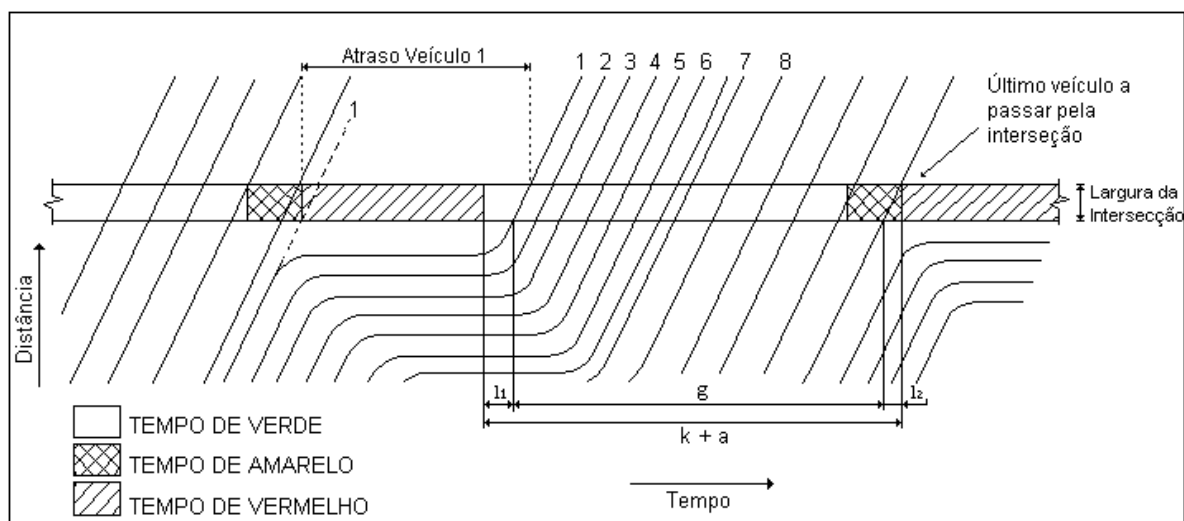


Fig. 3.3 – Diagrama Espaço-tempo do Movimento de Veículos Numa Interseção

Descrevendo melhor o que este diagrama demonstrado na figura 3.3 representa, quando o veículo 1 chega próximo a interseção, o sinal fica vermelho e este começa a diminuir sua velocidade até parar. Os outros veículos (2, 3, 4,...) também executam o mesmo procedimento, parando um atrás do outro. Quando o semáforo entra na fase de verde, o condutor do veículo 1 começa a acelerar até atingir a velocidade normal de movimento. Logo após, o veículo 2 também executa o mesmo processo, acelerando até atingir sua velocidade normal de circulação, o mesmo ocorrendo com os demais condutores.

A partir disto podemos definir alguns itens importantes para podermos verificar uma avaliação dos modelos de atraso de veículos:

Fluxo de Saturação (s): é a máxima taxa de veículos que podem circular numa determinada faixa de uma pista. Este dado é importante para descobrirmos qual é a máxima taxa de descarga de automóveis das filas formadas em uma faixa de pista.

Tempo Perdido (I): como podemos ver na figura 3.3, é a soma do tempo perdido no início do sinal verde (I_1) com o tempo perdido no final (I_2), já na fase amarela. Quando os veículos arrancam, existe um tempo para a percepção do motorista e a aceleração do automóvel, gerando I_1 . Existindo

ainda veículos na fila no final do sinal verde, estes usam a fase amarela para atravessar a interseção. Porém, a taxa de descarga neste instante é menor, pois os veículos reduzem sua velocidade, perdendo-se um tempo aí. Podemos definir então que tempo perdido é:

$$l = l_1 + l_2 \quad \text{Eq. 3-1}$$

Tempo de Verde Efetivo (g): o tempo durante o qual a luz do semáforo é verde, é definida como tempo de verde (k). Levando em consideração tempo perdido na arrancada dos automóveis quando o sinal fica verde, este passa a ser o tempo de verde líquido. Porém, o tempo de verde efetivo é definido como o tempo que realmente os veículos aproveitam, ou seja, é a soma do tempo de verde (k) com o tempo de amarelo (a), subtraído do tempo perdido total (l):

$$g = k + a - l. \quad \text{Eq. 3-2}$$

Percentual de Verde Efetivo (λ): é a relação entre o tempo de verde efetivo (g) e o ciclo C, sendo atribuído a uma faixa de uma pista:

$$\lambda = \frac{g}{C}. \quad \text{Eq. 3-3}$$

Grau de saturação (x): é a relação entre o número médio de veículos que chegam ao cruzamento durante um ciclo através de uma faixa e o número máximo de veículos que podem ser atendidos pelo cruzamento através desta faixa durante um ciclo. Podemos então definir a seguinte equação:

$$x = \frac{\text{nº veic. que chegam na fila}}{\text{nº máx. de veic. atendidos}} = \frac{C.q}{g.s} = \frac{C.q}{\lambda.C.s}. \quad \text{Eq. 3-4}$$

$$x = \frac{q}{\lambda.s} \quad \text{Eq. 3-5}$$

Onde q é a demanda de veículos e s é o fluxo de saturação de veículos da faixa considerada.

3.3 Temporização de Sinais Isolados

Existem várias maneiras de conseguirmos a temporização adequada para uma determinada interseção. É preciso determinarmos os valores em segundos de um ciclo e a partir disto obtermos os tempos de verde e de amarelo, sendo o restante, o tempo de vermelho. Em sistemas automatizados,

como o protótipo de controle de trânsito *fuzzy* desenvolvido aqui neste trabalho, não há necessidade de todos estes cálculos, pois se trata de um modelo de sistema que auto determina o seu ciclo. A figura 3.4 nos demonstra como é composto um ciclo de um semáforo com suas respectivas fases (vermelho, amarelo e verde).



Figura 3.4 - Ciclo de um Semáforo

O objetivo da fase amarela é o de alertar os condutores de automóveis que se aproximam de que a fase vermelha está para se iniciar e para que os veículos que já tenham alcançado a interseção possam atravessá-la. Para isso, Olson e Rothery [17] sugerem a adoção de um método de cálculo de tempo para a fase amarela (a), dado por:

$$a = t_r + \frac{d_f + L + d_e}{u} \quad \text{Eq. 3-6}$$

Onde:

t_r = tempo de reação do motorista (seg.)

u = velocidade de aproximação do veículo (m/s)

d_f = distância necessária para frear o veículo a partir da velocidade v (em metros)

L = largura da interseção (metros)

d_e = comprimento do veículo

No caso do dimensionamento da duração da fase verde, podemos citar várias técnicas de dimensionamento, sendo que apresentaremos duas delas aqui para fins de entendermos o problema.

- Whol e Martin [11]:

Segundo Whol e Martin, agregamos o tempo de amarelo à fase verde, trabalhando então com o tempo de verde efetivo (g). Os tempos de abertura para cada direção devem ser proporcionais aos fluxos nelas observados. Assim

para cada artéria seleciona-se o sentido de maior intensidade de tráfego, obtendo-se, dessa forma, os fluxos dominantes (em veículos por hora). Para o caso de uma interseção com duas direções de tráfego é necessário determinar inicialmente os tempos de verde efetivo g_1 e g_2 para cada direção. Admitindo-se a proporcionalidade de tempos de verde em relação aos fluxos q_1 e q_2 , tem-se:

$$g_1 = \frac{q_1}{q_1 + q_2} \cdot C_e \quad \text{Eq. 3-7}$$

$$g_2 = \frac{q_2}{q_1 + q_2} \cdot C_e \quad \text{Eq. 3-8}$$

onde C_e é a parcela útil do ciclo C , dada por:

$$C_e = C - (I_1 + I_2) \quad \text{Eq. 3-9}$$

Observamos, através da equação 3-9 que a parcela útil do ciclo é obtida subtraindo os tempos inúteis para cada uma das vias. Assim o tempo da fase verde (k) pode ser determinado pela equação:

$$k = g - a + I \quad \text{Eq. 3-10}$$

onde g é o verde efetivo, a o tempo da fase amarela e I ($I_1 + I_2$) o tempo perdido na interseção.

- Webster [10]:

Para o caso da determinação de tempo da fase verde, Webster assume o período de verde efetivo proporcional às taxas de ocupação das fases envolvidas. Ou seja, neste modelo, o tempo de verde efetivo total da interseção deve ser dividido para cada fase i , na proporção da máxima taxa de ocupação Y_i , que é a relação entre o fluxo observado q e o fluxo de saturação s de cada faixa de rua.

$$y = \frac{q}{s} \quad \text{Eq. 3-11}$$

Dados o número de fases n , o tempo de vermelho de segurança por fase R e o tempo perdido por fase I , o tempo total L perdido durante um ciclo é dado por:

$$L = n \cdot (I + R) \quad \text{Eq. 3-12}$$

O verde efetivo total para o ciclo torna-se:

$$g = C - L \quad \text{Eq. 3-13}$$

Para determinarmos o tempo de verde efetivo para uma fase i (g_i) fazemos:

$$g_i = g \cdot \frac{Y_i}{\sum_{j=1}^n Y_j} \quad \text{Eq. 3-14}$$

Finalmente, podemos determinar o tempo de verde associado a cada fase (k_i) através da equação 3.10, reescrita como:

$$k_i = g_i - a_i + l$$

Por fim, Webster determinou a equação do ciclo ótimo:

$$C = \frac{1,5 \cdot L + 5}{1 - \sum_{i=1}^n Y_i} \quad \text{Eq. 3-15}$$

As unidades C e L são em segundos. Esta expressão visa fornecer o tempo de ciclo ótimo para que uma interseção pré temporizada tenha o menor tempo de atraso de veículos possível.

3.4 Determinação do Atraso em Interseções Isoladas

Podemos definir atraso como a diferença entre o tempo em que um determinado veículo leva para cruzar uma interseção e o tempo que seria gasto para um veículo percorrer o mesmo percurso sem que tivesse que parar numa fila, ou diminuir sua velocidade por causa da interseção [14]. Se obtermos a média aritmética dos atrasos dos veículos que cruzam a interseção, teremos então o atraso médio. As fontes de atraso são os tempos gastos em aceleração e desaceleração de veículos submetidos às condições da interseção e o tempo de espera em sinal vermelho.

A primeira e provavelmente mais usada expressão para o atraso foi obtida por Webster [10], em 1958:

$$d = \frac{C \cdot (1 - \lambda)^2}{2 \cdot (1 - \lambda \cdot x)} + \frac{x^2}{2 \cdot q(1 - x)} - 0,65 \cdot \left(\frac{C}{q^2} \right)^{1/3} \cdot x^{(2+5 \cdot \lambda)} \quad \text{Eq. 3-16}$$

Onde:

d = atraso médio por veículo (s);

λ = percentual de verde efetivo ($\lambda = g/C$);

x = grau de saturação;

C = duração do ciclo (s);

q = demanda (veículo/segundo).

O primeiro termo da equação 3-15 representa o atraso para quando o tráfego possa ser considerado uniforme, ou seja, fluxo contínuo. Já o segundo termo é obtido através de um modelo de filas, onde os veículos chegam aleatoriamente, chamado também de atraso randômico. O terceiro termo da equação tem significado empírico, sendo que é considerado um termo de correção desenvolvido por Webster a partir de regressões de dados gerados por simulação através de computador (usou o Pilot Model Automatic Computing Engine – ACE). Com isto, analisando-se os resultados do atraso obtidos por simulação e aqueles dados pela soma dos dois primeiros termos, derivou-se o terceiro termo, que na verdade representa de 5% a 15% do atraso médio total.

Para simplificar a sua equação do atraso, Webster sugeriu o emprego de uma versão simplificada da expressão original, ou seja:

$$d = \frac{9}{10} \cdot \left[\frac{C \cdot (1 - \lambda)^2}{2 \cdot (1 - \lambda \cdot x)} + \frac{x^2}{2 \cdot q(1 - x)} \right] \quad \text{Eq. 3-17}$$

3.5 Conclusão

Os assuntos aqui apresentados neste capítulo foram extraídos da bibliografia utilizada e demonstram termos técnicos e teorias utilizadas em controle de trânsito. Os assuntos mais interessantes aqui tratados para o nosso trabalho foram a análise de interseções isoladas, a definição de atraso e a temporização dos semáforos (fase verde, amarela e vermelha). Com estas definições, mais as variáveis de tráfego demonstradas, ficaram mais claras e fáceis a execução do controle de trânsito inteligente proposto por esta dissertação, que será demonstrado nos capítulos 5 e 6, sendo que para qualquer projetista de tráfego, estes são assuntos indispensáveis. No capítulo seguinte, será verificada a técnica empregada para estabelecer um controle inteligente para o protótipo proposto.

Capítulo 4: LÓGICA *FUZZY*

4.1 Introdução

Antes de se começarmos a falar em Lógica *Fuzzy*, devemos comentar um pouco dos sistemas especialistas ([1], [20], [21], [22], [23]) como um todo, pois dentro da Inteligência Artificial, os sistemas especialistas possuem uma grande importância.

Sistemas especialistas são sistemas ou programas de computador que solucionam problemas que são solucionados apenas por pessoas especialistas (que acumularam conhecimento exigido) na resolução destes, ou seja, é um Sistema de Inteligência Artificial criado para resolver problemas em um determinado domínio cujo conhecimento utilizado é fornecido por pessoas que são especialistas naquele domínio. No geral, um sistema especialista é baseado em busca heurística e trabalha com problemas para os quais não existe uma solução convencional organizada de forma algorítmica disponível ou é muito demorada.

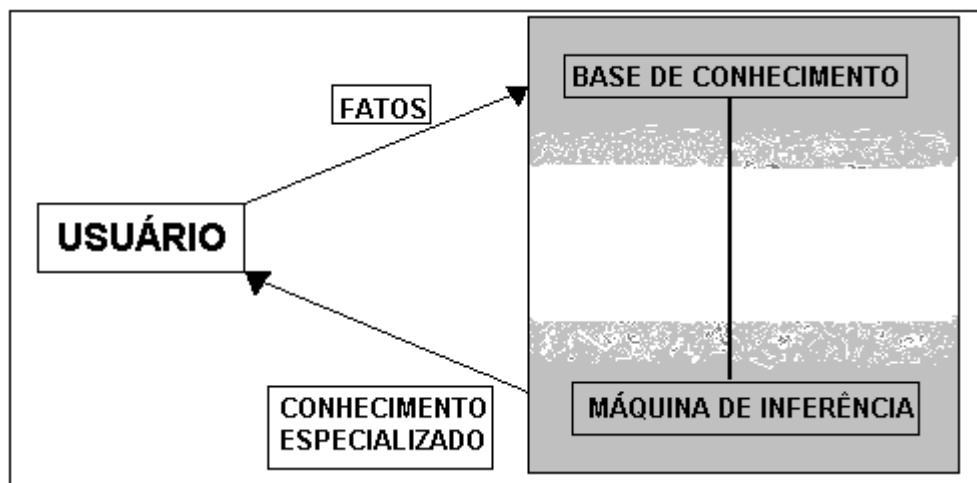


Fig. 4.1 – Estrutura Básica de um Sistema Especialista

Embora sistemas especialistas e peritos reais possam em alguns casos desempenhar tarefas idênticas, as características de ambos são criticamente diversas. Mesmo havendo algumas vantagens evidentes dos Sistemas Especialistas eles não poderão substituir os peritos em todas as situações

devido a algumas limitações inerentes. A tabela seguinte (tabela 1) resume esta comparação:

CONHECIMENTO HUMANO	CONHECIMENTO ARTIFICIAL
Percível	Permanente
Difícil de Transferir	Fácil de Transferir
Difícil de Documentar	Fácil de Documentar
Imprevisível	Consistente
Caro	Razoável
Baseado em Senso Comum	Técnico

Tabela 4.1 – Comparação Geral entre Conhecimento Humano e Conhecimento Artificial

Por outro lado, para demonstrar que os especialistas não podem ser simplesmente substituídos, o conhecimento artificial tem atualmente algumas limitações. Uma delas é falta de criatividade. Um perito pode reorganizar informações e usá-las para sintetizar novos conhecimentos; pode manusear eventos inesperados usando imaginação ou novas abordagens, inclusive raciocínio por analogia de um outro domínio completamente diferente.

As vantagens de utilizarmos um sistema especialista são vastas, sendo que podemos destacar, de uma maneira geral, que as principais são:

- Velocidade na solução dos problemas;
- A decisão está fundamentada em uma base de conhecimento;
- Segurança;
- Exige pequeno número de pessoas para interagir com o sistema;
- Estabilidade;
- Dependência decrescente de pessoal específico;
- Flexibilidade;
- Integração de ferramentas;
- Evita interpretação humana de regras operacionais.

A lógica *fuzzy* também é um sistema especialista. Esta, como veremos nos próximos capítulos, também é baseada em conhecimento já adquirido por um especialista, que fará ou fornecerá dados para construção de um programa utilizando este tipo de sistema. Também conhecida como lógica difusa, a lógica

fuzzy possui grande prestígio no mundo atual, principalmente em países desenvolvidos, como o Japão, sendo base para pesquisas e aplicações industriais/comerciais. Sua aplicabilidade é muito vasta, além da eficiência inegável. Neste capítulo, baseado na bibliografia ([1], [2], [3], [4], [5], [6], [7] e [28]) será verificado como se executa as etapas de um controle *fuzzy*, seus métodos e mecanismos de inferência e também algumas aplicações, sendo que o objetivo maior é introduzir o referido tema para que no capítulo seguinte seja este utilizado sem maiores dificuldades de entendimento.

4.2 Breve Histórico da Lógica Fuzzy

Em 1965, através de Lotfi A. Zadeh (Universidade da Califórnia, Berkeley), foi introduzido o conceito de conjunto *fuzzy* [7] [27]. Em meados da década de 60, Zadeh observou que os recursos tecnológicos disponíveis até então não conseguiam automatizar as atividades relacionadas a problemas de natureza industrial, biológica ou química, que compreendessem situações ambíguas, não passíveis de processamento através da lógica computacional fundamentada na lógica booleana (lógica baseada em 0 e 1). Então, foi publicado por Zadeh em 1965 um artigo resumido com os conceitos dos conjuntos *fuzzy*, proporcionando sistemas que resolveriam os problemas não conseguidos pelas lógicas clássicas. Mais tarde, ele elaborou suas idéias em um artigo de 1973 onde introduziu o conceito de "variáveis lingüísticas", o qual neste artigo comparou variável definida com um conjunto *fuzzy*.

A partir daí, surgiram algumas aplicações pelo mundo, sendo mais bem desenvolvido em aplicações industriais (década de 70). Porém, os sistemas *fuzzy* foram amplamente ignorados nos Estados Unidos porque foram associados com Inteligência Artificial, um campo que periodicamente se obscurecia, resultando numa falta de credibilidade por parte da indústria.

Na década de 80, os japoneses começaram a investir na nova idéia. O interesse em sistemas *fuzzy* foi demonstrado em simulações que demonstraram a superioridade de sistemas de controle *fuzzy* para a estrada de ferro de Sendai. Suas idéias foram adotadas e sistemas *fuzzy* foram usados para controle de aceleração, frenagem, e parada quando a linha foi inaugurada em 1987.

Com isto, surgiram inúmeras aplicações, como o controle do pêndulo invertido, fazendo os cientistas japoneses se apaixonarem pelos sistemas *fuzzy*. Com isto, foram desenvolvidas tanto aplicações industriais como aplicações para consumo.

Bens de consumo japoneses utilizam em larga escala sistemas *fuzzy*. Aspiradores de pó rodando algoritmos *fuzzy* que interrogam sensores de pó e ajustam o poder de sucção, máquinas de lavar usam controladores *fuzzy* para controle de peso, verificação de tipo de tecido, e sensores de sujeira e automaticamente selecionam os ciclos de lavagem para o uso otimizado de potência, água, e detergente, câmeras de vídeo com autofoco que, através da lógica *fuzzy*, controla a luminosidade da cena a ser filmada, controla velocidade e movimento do que esta filmando, reduzindo falhas de gravação e má qualidade de vídeos. O entusiasmo dos japoneses por lógica *fuzzy* é refletido na ampla faixa de outras aplicações que eles tem investigando ou implementado: reconhecimento de caracteres, sistemas *fuzzy* óticos, robôs, helicópteros comandados por voz através de um robô, sistemas de elevadores, entre outras.

Hoje a lógica *fuzzy* possui como seu grande carro chefe, como visto, o Japão. Nos EUA e na Europa existem também trabalhos sendo desenvolvidos neste sentido, tanto na área de pesquisa industrial como na de bens de consumo. A Agência de Proteção Ambiental nos EUA tem investigado controle *fuzzy* para motores de energia eficaz, e a NASA tem estudado controle *fuzzy* para ancorar suas naves automaticamente no espaço; simulações mostram que um sistema de controle *fuzzy* pode reduzir em muito o consumo de combustível. Firmas como a Boeing, General Motors, Allen-Bradley, Chrysler, Eaton e Whirlpool têm trabalhado em lógica *fuzzy* para uso em refrigeradores de baixa potência, melhorando a transmissão automotiva, e motores elétricos de energia eficaz.

Hoje, as pesquisas sobre lógica *fuzzy* continuam, visto que sua gama de aplicabilidade é muito vasta. Pesquisa e desenvolvimento em aplicações *fuzzy* para projeto de softwares, incluindo sistemas especialistas *fuzzy* e integração de lógica *fuzzy* com redes neurais, os denominados algoritmos genéticos adaptativos, com o objetivo de construção de um sistema *fuzzy* capaz de

aprender, são exemplos de pesquisas atuais que hoje são realizadas a nível mundial.

4.3 Controle *Fuzzy*

4.3.1 Introdução aos Conjuntos *Fuzzy*

O termo "lógica *fuzzy*" a princípio nos convida a pensar em algo confuso (nebuloso), mas podemos entender que a lógica *fuzzy* é um modo de interfacear inerentemente processos analógicos que se deslocam através de uma faixa contínua para um computador digital que podem ver coisas com valores numéricos bem definidos (valores discretos).

Por exemplo, considerando um sistema de iluminação controlado por um microcontrolador, este toma as decisões de quanto de energia podemos aplicar em um aparelho de iluminação baseado em um sensor.

A variável "iluminação" neste sistema pode ser dividida dentro de uma faixa de "escuro": "razoável", "boa" iluminação, "ideal", "muito clara". Contudo, a transição de um estado para o próximo é difícil de fixar. Um limiar arbitrário deve ser indicado para dividir o "escuro" do "ideal", mas isso resultaria uma mudança descontínua quando o valor de entrada passasse pelo limiar. O microcontrolador deveria ser capaz de detectar isso.

O caminho é criar os estados "*fuzzy*", que é, permitir a mudança gradual de um estado para o outro. Você poderia definir a iluminação de entrada usando funções intermediárias.

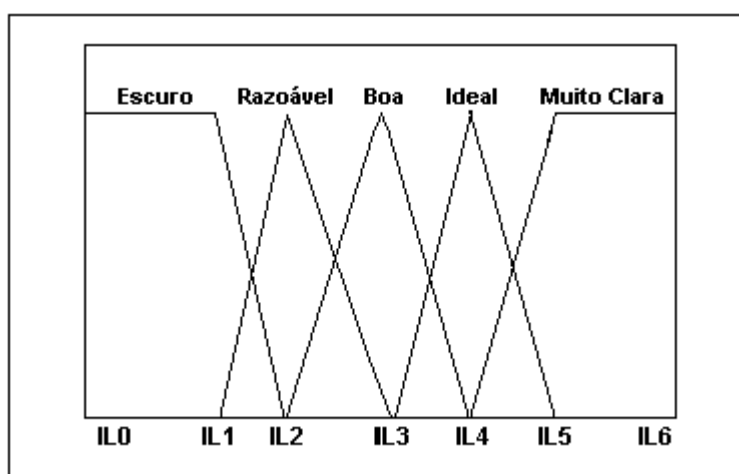


Fig. 4.2 – Conjuntos *Fuzzy* para Sistema de Controle de Iluminação

Desta forma, o estado da variável de entrada (iluminação) não mais salta abruptamente de um estado para o próximo, ocorrendo, ao invés disso, a perda gradual do valor de um estado enquanto vai ganhando valor no próximo estado.

As variáveis de entrada em um sistema de controle *fuzzy* (ver fig. 4.2) são em geral mapeadas dentro de conjuntos de funções consecutivas. O processo de conversão de um valor de entrada intermediário em um valor *fuzzy* é chamado de "*fuzzificação*". Determinando o mapeamento das variáveis de entrada dentro das funções consecutivas e valores verdadeiros, o microcontrolador então toma decisões para que as ações efetuadas segundo as regras:

SE *iluminação do ambiente* **É** *escura*

ENTÃO *iluminação de saída* **É** *alta*

onde, neste caso, a variável de entrada iluminação do ambiente, ao detectar que a sua situação é “escura”, ordena que a iluminação de saída seja alta, ou seja, a potencia que a luminária de energia estará consumindo será alta.

De qualquer maneira esta regra por si só é muito confusa desde que é observada como uma simples regra que poderia ser usada sem preocupação sobre lógica *fuzzy*, mas é preciso lembrar que a decisão é baseada em um conjunto de regras, onde todas as regras aplicadas são invocadas, usando as funções consecutivas e valores verdadeiros obtidos nas entradas, para determinar o resultado da regra. Depois, dentro de um processo conhecido como “*defuzzificação*”, o valor obtido dentro do processo *fuzzy*, volta como um valor real, controlando a variável de saída, resultando uma resposta específica.

Controles tradicionais de sistemas são em geral baseados em modelos matemáticos que descrevem este sistema usando uma ou mais equações diferenciais que definem a resposta do sistema para suas entradas; tais sistemas são freqüentemente implementados pelo chamado controlador "PID" (proporcional-integral-derivativo). Tais controladores são produtos de décadas de desenvolvimento e trabalho teórico e são altamente eficazes. A lógica *fuzzy* surgiu para também resolver estes problemas, porém a sua modelagem é mais intuitiva. A lógica *fuzzy* possui implementações de baixo custo baseado em

sensores baratos, conversores A/D de baixa resolução, de chips microcontroladores de 4 ou 8 bits, sendo que tais sistemas podem ser facilmente atualizados através da soma de novas regras para aperfeiçoar a performance ou somar novas características. Em muitos casos, controle *fuzzy* pode ser usado para melhorar um sistema de controle já existente somando um grau de inteligência ao método de controle existente.

4.3.2 Conceituação do Controle *Fuzzy*

Controladores *fuzzy* são muito simples conceitualmente, pois consistem de um estágio de entrada (*crisp*), um estágio de processamento, e um estágio de saída. O estágio de entrada mapeia dados de sensores ou de outros tipos de entrada (tais como chaves, interruptores e assim por diante) de maneira apropriada às funções consecutivas e valores verdadeiros. O estágio de processamento é onde se procura alcançar a solução para os problemas. Este podendo ser dividido em três passos básicos: *fuzzificação*, regras de avaliação e *defuzzificação*. Aqui é invocada cada regra adequada e gera um resultado para cada uma delas e então combinam os resultados dessas regras. Por último, nós temos um estágio de saída, que é onde o resultado já *defuzzificado* da operação é colocado para dentro do sistema, executando um controle (saída *crisp*).

Descrevendo os passos dos processos de controle *fuzzy*, podemos observar que o que ocorre durante os processos de *fuzzificação*, regras de avaliação e *defuzzificação*. Estes passos é que descrevem exatamente todo o funcionamento do controle *fuzzy*. A figura 4.3 descreve uma breve ilustração dos passos para o controle *fuzzy* se executar.

Podemos entender que o passo *fuzzificação* é onde ocorre transformação das entradas *crisp* em entradas *fuzzy*. Ou seja, envolve a tomada de um valor *crisp* (valor de entrada), que combinando esta com as funções dos conjuntos *fuzzy*, produzem saídas *fuzzy*.

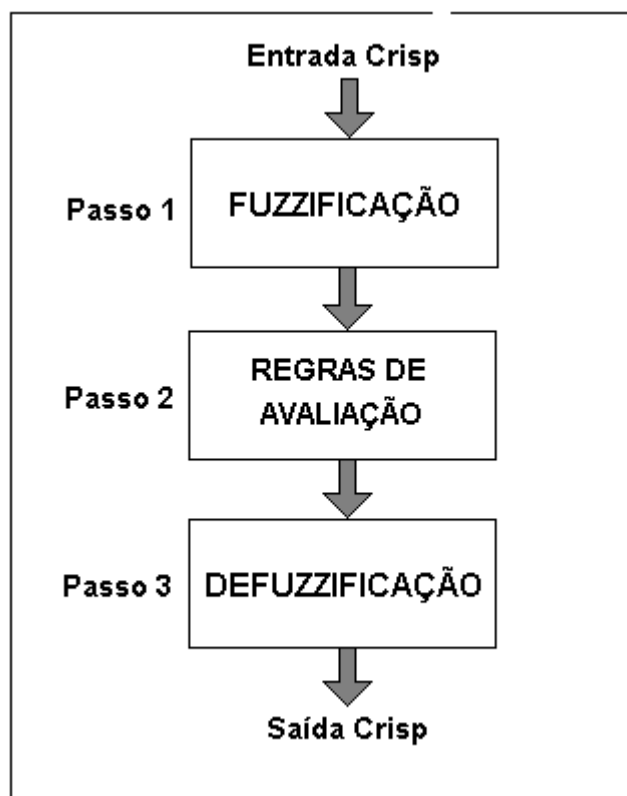


Fig. 4.3 – Controle *Fuzzy*

No segundo passo, o de avaliação das regras, é onde a técnica chamada de inferência de min-max é geralmente usada para calcular um valor numérico representando uma verdade para uma certa ação conseqüente baseado em um conjunto de regras lógicas na forma de declarações SE - ENTÃO (IF – THEN), onde o SE é chamado de "antecedente" e o ENTÃO é chamado de "conseqüência". O resultado das regras de avaliação é uma saída *fuzzy* para cada tipo de ação conseqüente.

O passo final no processamento da lógica *fuzzy* é a *defuzzificação*. Aqui é que um esperado valor de uma variável de saída é derivado isolando um valor crisp dentro do universo de discurso dos conjuntos *fuzzy* de saída. Ou seja, os valores do processamento da lógica *fuzzy* termina com o seu retorno em forma de saída não *fuzzy*, ou seja, uma saída *crisp*.

4.4 *Fuzzificação* e Funções de Pertinência

O primeiro passo no processo da lógica *fuzzy* envolve um domínio de transformação chamado de *fuzzificação*, ou seja, entradas *crisp* são transformadas em entradas *fuzzy*. Para isto, são primeiramente determinadas

as funções de pertinência para cada entrada do sistema a ser controlado. Uma vez estas funções de pertinência são nomeadas, a *fuzzificação* recebe um valor de entrada em tempo real e compara com a informação da função de pertinência armazenada para produzir um valor de entrada *fuzzy*.

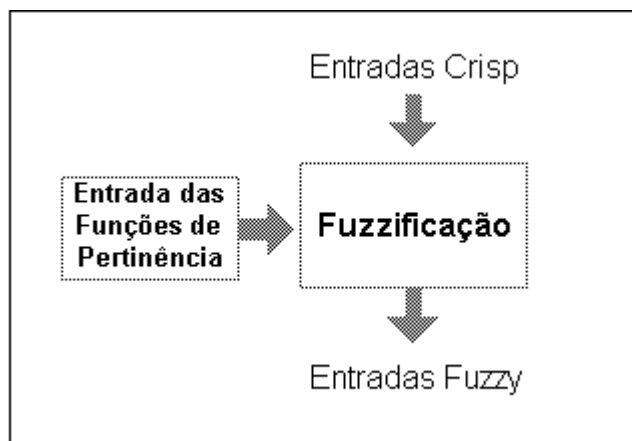


Fig. 4.4 – Processo de *Fuzzificação*

O primeiro passo na *fuzzificação* é o processo de colocar nomes no universo de discurso de cada entrada *crisp*. O universo de discurso pode ser descrito como a faixa de valores associados a uma variável *fuzzy*, onde seriam definidos vários conjuntos *fuzzy*, dentro de um universo de discurso, cada qual com o seu próprio domínio, que sobrepõe com os domínios dos seus conjuntos *fuzzy* vizinhos. Ou seja, o universo de discurso se refere a o domínio que se dá a um determinado conjunto.

Podemos pegar como exemplo o controle de temperatura ambiente de um sistema de ar condicionado para exemplificar como se estabelece o domínio de cada função de pertinência. Verificamos na figura 4.5 (extraída do tutoria sobre lógica *fuzzy* da Motorola [28]) que cada um dos conjuntos recebe um rotulo, ou seja, um nome: Frio, Fresco, Normal, Morno, Quente.

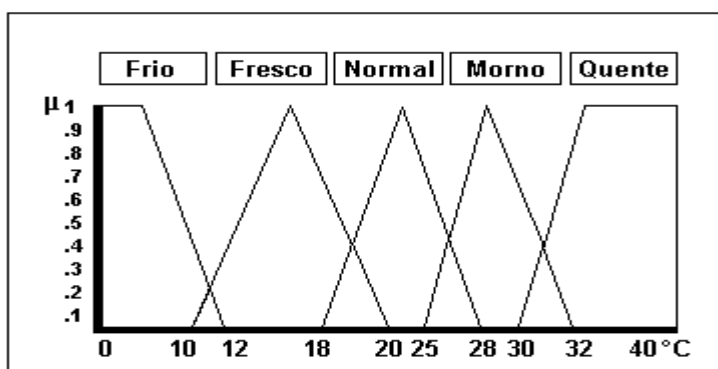


Fig.4.5 - Conjuntos *Fuzzy* para Controle de Temperatura

Cada conjunto também recebe uma faixa de valores correspondendo ao nome que lhe foi dado. Este valor é chamado de grau de pertinência. Por exemplo, a condição “Normal” obteve um domínio de 18°C a 28°C. No eixo vertical (Y) podemos verificar os valores referidos para os graus de pertinência das entradas *crisp* em cada conjunto *fuzzy*.

A figura 4.6 mostra, em um gráfico *fuzzy*, o nome indicado para o grau de pertinência, a função de pertinência e o seu nome ou rótulo, o local da entrada *crisp*, o domínio da função e o universo de discurso.

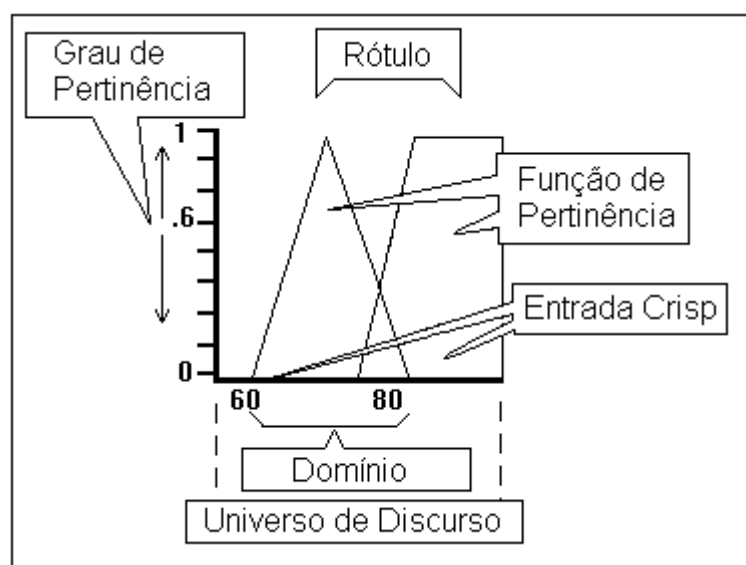


Fig. 4.6 – Descrição de um Gráfico *Fuzzy*

As funções de pertinência, também conhecidas como conjuntos *fuzzy*, são na verdade funções matemáticas que fornecem um significado numérico para um conjunto *fuzzy*. A etapa de *fuzzificação* mapeia a entrada (um valor definido, ou *crisp*) entre valores de 0 a 1, através das funções de pertinência, que é o grau de pertinência, já comentado anteriormente.

As funções mais utilizadas são:

- Triangular: é especificada por três parâmetros $\{a,b,c\}$, a qual determina a coordenada x dos três cantos do triângulo (fig. 4.7).

$$\text{Triângulo}(x;a,b,c) = \max(0, \min[(x-a)/(b-a), (c-x)/(c-b)])$$

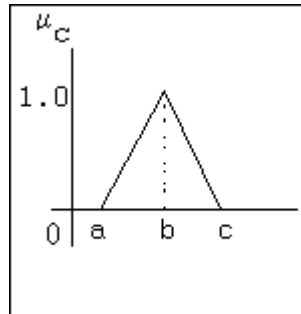


Fig.4.7 – Função Triângulo

- Trapezoidal: é especificada por quatro parâmetros {a,b,c,d} (fig. 4.8).

$$\text{Trap}(x;a,b,c,d) = \max(0, \min[(x-a)/(b-a), 1, (d-x)/(d-c)])$$

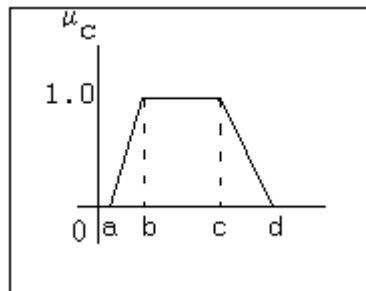


Fig. 4.8 – Função Trapezoidal

- Gaussiana: é especificada por dois parâmetros {s,c} (fig. 4.9).

$$\text{Gaussiana}(x;s,c) = \exp\{-(x-c)/s\}^2$$

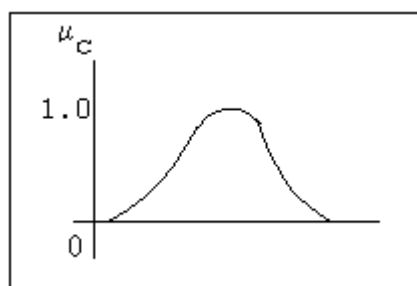


Fig. 4.9 – Função Gaussiana

- Sino: é especificada por três parâmetros {a,b,c} (fig. 4.10).

$$\text{Sino}(x;a,b,c) = 1/(1+[(x-c)/a]2b)$$

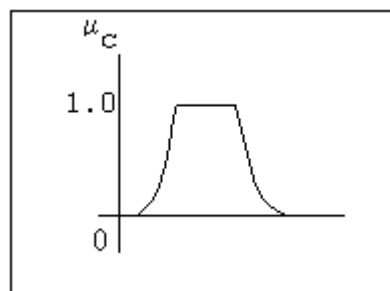


Fig. 4.10 – Função Sino

- Sigmoidal: é especificada por dois parâmetros {a,c} (fig. 4.11).

$$\text{Sig}(x;a,c) = 1/(1 + \exp[-a(x-c)])$$

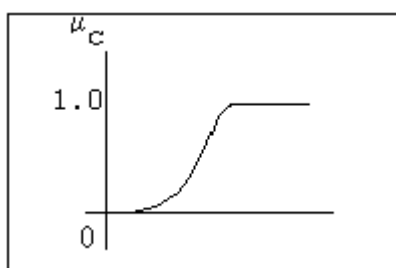


Fig. 4.11 – Função Sigmoidal

É bom salientar que as saídas *fuzzy* também têm funções de pertinência, que fazem parte dos temas regras de avaliação e *defuzzificação*. É aqui que o processador *fuzzy* utiliza regras lingüísticas, definindo que ação o controle deverá fazer em resposta a um dado conjunto de entrada de valores.

4.5 Regras de Avaliação

Como demonstrado na figura 4.3 anteriormente, o segundo passo do processo de lógica *fuzzy* é as regras de avaliação. Estas, também chamadas de inferência *fuzzy*, aplicam as regras às entradas *fuzzy* que foram geradas no processo de *fuzzificação*. Neste segundo passo, a regra chamada min-max é geralmente usada para calcular um valor numérico representando a verdade para uma certa ação conseqüente baseada em um conjunto de regras que dão suporte a conseqüência. A inferência min-max leva o mínimo dos antecedentes para determinar as regras de maior força e o máximo das regras de maior força para cada conseqüente, determinando assim as saídas *fuzzy*. O resultado das regras de avaliação é uma saída *fuzzy* para cada ação conseqüente. A figura 4.12 nos demonstra como este processo ocorre.

As regras *fuzzy* são usualmente declarações SE – ENTÃO (*IF-THEN*) que descrevem a ação a ser feita em resposta a varias entradas *fuzzy*. Podemos usar como exemplo o sistema de controle de ar condicionado (controle de temperatura ambiente) *fuzzy* da figura 7, onde uma das regras poderia ser a seguinte:

- **SE** temperatura é Quente, **ENTÃO** Ar condicionado funcionara na temperatura Frio.

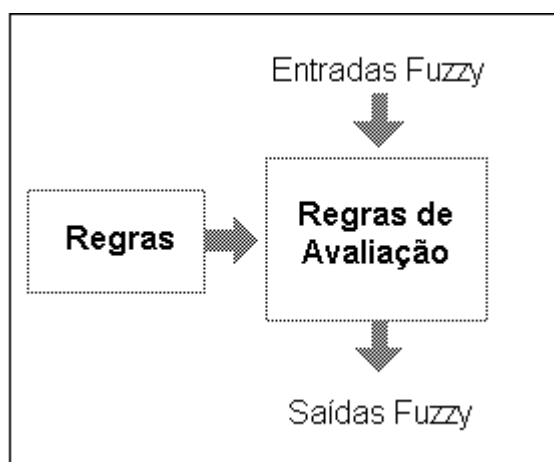


Fig. 4.12 – Regras de Avaliação

Outros exemplos podem ser feitos, como para um sistema de irrigação, utilizando o operador AND (E):

SE solo é úmido **E** temperatura é quente, **ENTÃO** irrigação tem duração curta.

Em síntese, o formato das regras obedece ao seguinte padrão:

SE (antecedente 1) **E** (antecedente 2)... **ENTÃO** (consequente 1) **E** (consequente 2)...

As regras de avaliação *fuzzy*, resumidamente obedecem aos seguintes passos, que sintetizam o que foi descrito até aqui:

- Criamos regras que descrevam o comportamento do sistema desejado;
- Para valores de entrada *crisp* particular, determina-se o grau de verdade de cada antecedente usando a *fuzzificação* transformada;
- Ache-se a força da regra que é igual ao mínimo dos graus de antecedente de verdade;

- Obtêm-se as saídas *fuzzy* que são igual às forças de regra de máximo por cada rótulo (nome) conseqüente.

4.6 Defuzzificação

O resultado da inferência *fuzzy* é um conjunto de saída *fuzzy*. Porém, em muitos casos, é desejável um valor discreto de forma que o sistema saiba o que fazer. Ou seja, na *defuzzificação* nós convertemos os valores de saída *fuzzy* para valores de saída *crisp*.

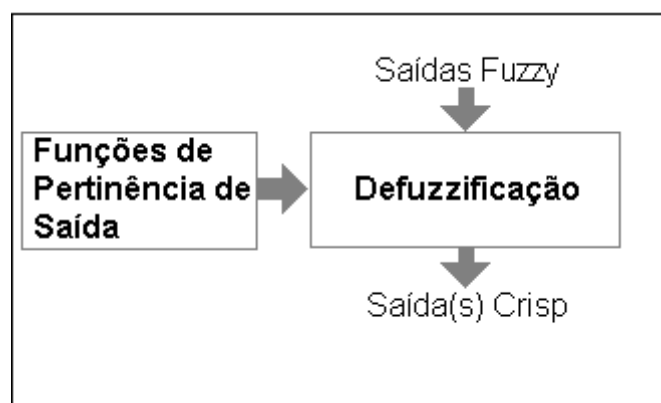


Fig. 4.13 – Defuzzificação

O sistema *fuzzy* ao receber uma entrada *crisp*, transforma esta em uma entrada *fuzzy*, que por sua vez é submetida a o sistema de inferência (regras *fuzzy*) que devolve uma saída *fuzzy* para este sistema. Na *defuzzificação*, nós deveremos produzir uma saída *crisp* precisa. A figura 4.14 nos demonstra como chegamos até esta saída final para o sistema nebuloso.

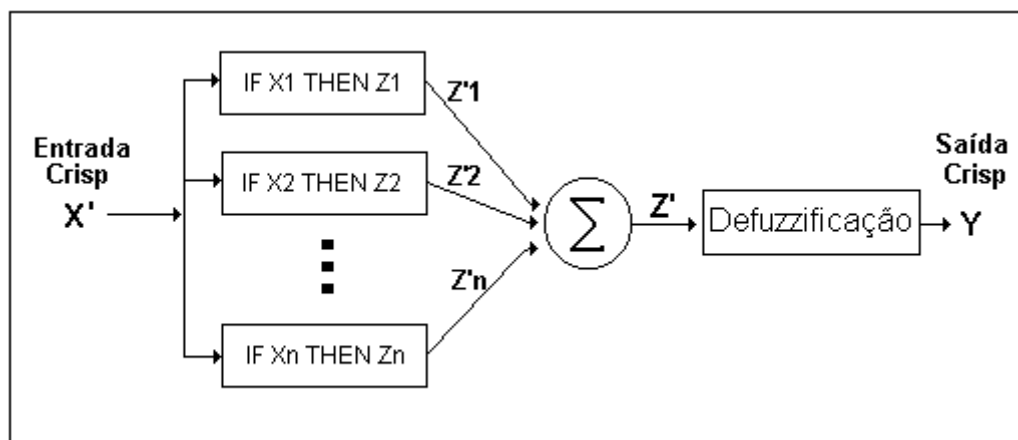


Fig. 4.14 – Sistema *Fuzzy* ilustrando todos os passos para se chegar na saída precisa

4.6.1 Métodos de Defuzzificação

Existem estratégias diferentes de executar a *defuzzificação*. Podemos citar três delas:

- *Defuzzificador* de Máximo
- Média dos Máximos
- Centróide ou centro de gravidade

Estas estratégias de *defuzzificação* indicadas são as mais utilizados sendo a mais popular o a que leva em consideração o centro de gravidade.

O método de máximo, resumidamente descrevendo, é onde se acha o ponto no qual a distribuição de saída possui o seu valor máximo. Ou seja, depois de definidas as saídas *fuzzy*, devemos aplicá-las nas funções de pertinência de saída (que obedecem as mesmas definições dos conjuntos de entradas, como triangular, senóide, etc.), gerando pontos de valores nestes conjuntos. O primeiro valor de máximo encontrado será o valor da saída *crisp*.

Na figura 4.15 (meramente ilustrativa, sem exatidão de escala), nós podemos verificar um exemplo deste tipo de *defuzzificação*. Suponhamos um sistema *fuzzy* que controle temperatura de um ambiente com as entradas *crisp* Temperatura e Umidade e uma saída que controla a velocidade de um ventilador (Baixa Velocidade, Velocidade 2, Velocidade 3 e Alta Velocidade). O valor de saída *crisp* será o primeiro valor mais alto que resultar das saídas *Fuzzy*.

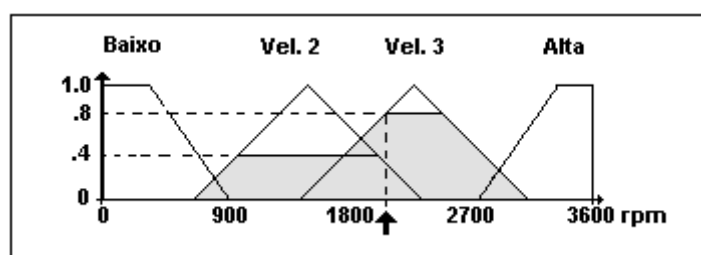


Fig. 4.15 – Definição de ponto de Máximo para *Defuzzificação*

A estratégia que utiliza-se da média dos máximos é muito parecida com a anterior (critério dos máximos), porém aqui, será achado um valor médio onde a saída possui seus máximos valores. Na figura 4.16 podemos verificar onde seria a nossa saída *crisp* para o mesmo sistema descrito anteriormente para o caso do *Defuzzificador* Máximo (fig. 4.15).

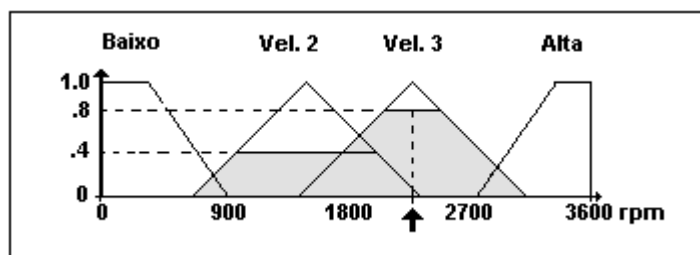


Fig. 4.16 – Definição de Media dos Máximos para *Defuzzificação*

A estratégia que utiliza o centro de gravidade, ou centróide, é o método comumente usado para *defuzzificação*. Aqui é procuramos o centro de gravidade da distribuição de saída *fuzzy*. Observemos na figura 4.17 que a parte com a cor cinza é a distribuição que a saída *fuzzy* proporcionou, sendo que desta foi definida a saída *crisp* pelo centro de gravidade da figura representada. (utilizando o mesmo sistema colocado nos casos de *defuzzificação* anteriores, fig. 4.15 e fig. 4.16). É importante salientar que esta estratégia que utiliza o centro de gravidade é a que foi adotada pelo controlador de trânsito utilizando lógica *fuzzy* que é descrito nos capítulos 5 e 6.

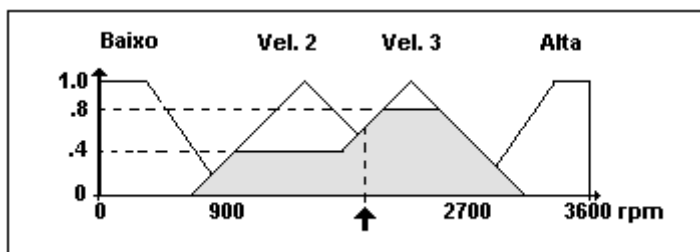


Fig. 4.17 – Definição de Centro de Gravidade para *Defuzzificação*

Após a *defuzzificação*, o sistema *fuzzy* deve operar com o valor *crisp* a que foi resultado da operação de controle, ou seja, dadas às entradas, este o processa e devolve uma saída para controlar ou dar uma resposta a um sistema.

4.6.2 Mecanismos de Inferência

É importante também ser comentado que existe alguns modelos de inferência *fuzzy* que são largamente utilizados em várias aplicações. Geralmente as diferenças entre os sistemas está na sua parte conseqüente, no seu processo de agregação das várias de regras e na *defuzzificação* do sistema. Entre os modelos existentes, destaca-se os Modelos fuzzy de Tsukamoto, Larsen, Sugeno e Mamdani.

Para realizar o protótipo de controle trânsito utilizamos o modelo de Mamdani, que é definido da seguinte forma: as implicações *fuzzy* são modeladas pelo operador de Mamdani mínimo e as regras são agregadas através do operador de união máximo. Assumindo duas regras SE-ENTÃO da seguinte forma:

Se x é A_1 e y é B_1 **ENTÃO** z é C_1

Se x é A_2 e y é B_2 **ENTÃO** z é C_2

Podemos então dizer que x é x_0' e y é y_0' , tendo como consequência que z é C .

A ativação de cada regra, denotado por α_i , onde $i = (1,2)$, são calculadas por:

$$\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0)$$

$$\alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0)$$

onde x_0 e y_0 são as entradas x_0' e y_0' fuzzificadas. A regra individual de cada saída é obtida por:

$$C'_1(w) = (\alpha_1 \wedge C_1(w))$$

$$C'_2(w) = (\alpha_2 \wedge C_2(w))$$

Então toda a saída do sistema é calculada para originar a regra individual de saída:

$$C(w) = C'_1(w) \vee C'_2(w) = (\alpha_1 \wedge C_1(w)) \vee (\alpha_2 \wedge C_2(w))$$

Com isto, finalmente se obter uma ação de controle determinístico, nós podemos empregar qualquer estratégia de defuzzificação. A figura a 4.18 nos demonstra como é executado o mecanismo de inferência Mamdani.

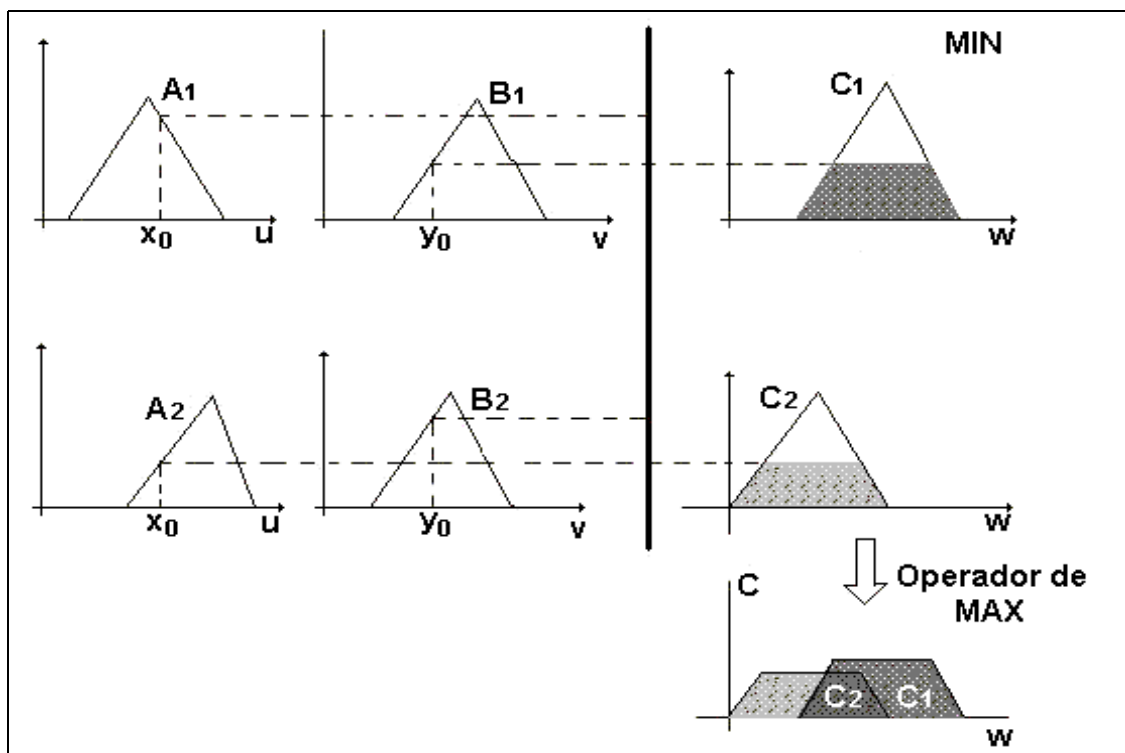


Fig. 4.18 – Mecanismo de Inferência *Fuzzy* de Mamdani

4.7 Conclusão

Podemos verificar então que a lógica *fuzzy*, que foi desenvolvida por Lotfi A. Zadeh, é de muita utilidade no mundo real. Sua utilização depende de um conhecimento pré-estabelecido por pessoas especialistas. Um sistema *fuzzy* bem desenvolvido pode tomar decisões dentro de uma gama de conhecimento.

Um controle *fuzzy* para se executar depende de três etapas. A primeira é basicamente receber os valores de entrada para o sistema, sendo chamados de entradas *crisp*. Este valor é *fuzzificado* tornando-se um valor *fuzzy*. Depois disso ocorre a aplicação das regras resultando um valor de saída para cada entrada. Por fim, este valor é *defuzzificado*, sendo transformado de *fuzzy* para *crisp*, sendo que o resultado será aplicado no processo que está sendo controlado.

Com tudo, verificamos que a lógica *fuzzy* pode tornar sistemas complicados em sistemas facilmente solucionáveis, além de facilitar os problemas que existem hoje, diminuindo seu grau de dificuldade.

Capítulo 5: MODELO DE APLICAÇÃO DE LOGICA *FUZZY* EM CONTROLE DE TRÂNSITO

5.1 Introdução

Visto o problema levantado, é possível representa-lo de uma forma prática com um controle trânsito utilizando lógica *fuzzy*. Para isto é necessário estabelecermos problemas a serem resolvidos, ou seja, fazermos com que um protótipo de controle de trânsito utilizando lógica *fuzzy* seja submetido a situações envolvendo interseções, cujos fluxos de veículos nestas sejam identificados.

Tanto os sistemas de controle de trânsito com tempo pré-determinados, como os sistemas realimentados pela variação fluxo dos veículos precisam, antes de qualquer coisa, de um estudo aprofundado para verificar as reais condições físicas (como é construída a interseção) como também a característica do tráfego local. Existem ainda outros parâmetros que devem ser analisados também, mas podemos dizer que sem verificação, levantamento de dados e estudo do local onde se pretende controlar o tráfego, não se obtém um projeto com o mínimo de confiabilidade. Por tanto, ainda não é possível obtermos um software ou um modelo universal, que contemple todos os possíveis casos.

Este capítulo irá apresentar três modelos de interseções, sendo dois fictícios e um real, extraído de [16], para serem analisados e por fim serem colocados sob simulação de um Protótipo de Controle Fuzzy de Trânsito (PCFT), o qual pretende analisar duas situações: no primeiro momento um sistema variando o tempo de verde dos semáforos da interseção conforme o fluxo nas avenidas, e num segundo momento, variando este tempo de verde conforme o período do dia.

5.2 Objetivos do Modelo de Controle *Fuzzy* para Trânsito

Como verificamos até agora, os controles de interseções de tempo fixo possuem grande importância no estudo de tráfego urbano. Um dos objetivos

deste trabalho era justamente saber como se obtém os tempos de verde para cada semáforo para um determinado cruzamento. Os modelos apresentados no capítulo 3, que servem tanto para avaliar o desempenho dos cruzamentos como para projetá-los, aqui serão de pouca utilidade. A fórmula de Webster para o atraso, por exemplo, não pode ser aplicada em sistemas de controle inteligente, pois estes não satisfazem a referida equação. Ou seja, a utilização de modelos analíticos torna-se complicada, sendo em alguns casos, até impossíveis.

O objetivo do Protótipo de Controle Fuzzy de Trânsito (PCFT) é o de termos uma ferramenta que possa servir para executar o gerenciamento de semáforos para uma determinada interseção. Deseja-se também que o PCFT tenha algumas habilidades em especial:

- Consiga obter os tempos de verde para todos os semáforos da interseção, variando este conforme a demanda de veículos e que estes tempos tenham um ciclo máximo em torno de 130 segundos (soma de todos os tempos de verde com o tempo da fase amarela de cada semáforo);
- Consiga também analisar esta interseção com tempos pré-fixados utilizando lógica *fuzzy*;
- Forneça uma situação de como será o ciclo completo desta interseção;
- Que este analise vários tipos de interseções, com diferentes fluxos de veículos, para verificar seu funcionamento em diferentes situações;
- Que faça dois tipos de simulação: uma variando o tempo de verde dos semáforos conforme demanda de fluxo de veículos e outra conforme o horário do dia, em uma tentativa de melhorar os semáforos semi-automáticos ou de tempo fixo;
- Possa ter uma interface com usuário agradável e de fácil compreensão;
- Dê idéia do sistema *fuzzy* empregado para cada análise realizada.

Além disso, o PCFT será executado no software *Matlab®*, o qual possui ótimas ferramentas para a utilização da lógica *fuzzy*. Isto lhe dá uma maior confiabilidade dos seus resultados, sendo que se trata de uma ferramenta poderosa para as áreas de engenharia, matemática, entre outras.

Esperamos também, através de simulações com o PCFT, verificar se existe redução da média de tempo de espera nos semáforos. Isto é muito

importante, no sentido que, com a redução dos tamanhos de tempo de ciclo, quando possível, os condutores de veículos não sofrem tantas perdas de tempo nas interseções. O meio mais correto para isto é se fazer uma comparação, colocando o protótipo em uma situação real.

Além disso, o sistema não se preocupará com o tempo de amarelo de cada semáforo, sendo que este será um valor fixo de 4,5 segundos. Este valor será adicionado ao tempo de verde calculado pelo sistema *fuzzy* e fará parte do ciclo de cada semáforo.

Por fim, é preciso salientar que, com os resultados obtidos, queremos aqui provar que um sistema de controle de trânsito utilizando lógica *fuzzy* pode ser implementado de maneira simples e de muita confiabilidade. Como vimos no capítulo 4, a lógica *fuzzy* possui muitas aplicações, facilitando muito a resolução de problemas.

5.3 Protótipo de Controle de Trânsito Utilizando Lógica *Fuzzy*

O PCFT (Protótipo de Controle *Fuzzy* de Trânsito), como já comentado, terá o grande objetivo de conseguir fornecer o tempo de verde para cada semáforo de uma determinada interseção, variando conforme o fluxo de veículos da mesma.

Algumas suposições são necessárias fazermos, já que estamos tratando de um protótipo e não de uma implementação comercial. Este modelo desenvolvido no software *Matlab®* precisa de considerações para que possamos entendê-lo melhor:

- Sempre que uma interseção é analisada, na situação de controle por sensor de fluxo de tráfego, é preciso saber que o software estará esperando um valor de fluxo de veículos para cada avenida (ou rua, ou faixa,...). Na prática, isto seria uma entrada de dados vindo de um sensor posicionado no asfalto que nos daria um número de veículos que chegaria na interseção e o número que ultrapassa a mesma, enviando ao controlador de trânsito o número de atendimentos que o software deverá executar seus cálculos.

- No caso dos semáforos com tempo pré-determinado a entrada sempre será o período do dia em que se quer analisar, sendo um vetor de hora suficiente para se obter o valor das saídas.
- O PCFT não é universal, ele apenas analisa interseções pré-estabelecidas, ou seja, para se fazer uma nova análise, é preciso refazer os conjuntos *fuzzy*, repensar as regras, as funções de pertinência, estudar o caso, entre outras tarefas que exigem um bom projeto de trânsito.
- Não se considerou no protótipo, por exemplo, calculo de tempo de travessia de pedestre. Trata-se de um tema fundamentalmente importante na hora de se fazer um projeto de uma interseção sinalizada, porém, não se possui este objetivo no trabalho.
- As funções de pertinência de todos os sistemas analisados foram triangulares, pois dentro das simulações realizadas foram as que melhor se portaram em termos de resultados.

O PCFT é constituído de um conjunto de três casos de interseções, sendo duas propostas para fins de simulação e um caso real. A descrição de cada uma das situações e a explicação de como foi implementado no protótipo é observada abaixo.

5.3.1 Sistema 1

No primeiro caso, tratamos de uma interseção simples, conforme a figura 5.1 representada a seguir. Neste sistema 1 analisado pelo PCFT, se possui uma interseção com quatro avenidas com diferentes fluxos de veículos que resulta em diferentes tempos de verde nos semáforos. O funcionamento dos quatro semáforos é de quatro fases, ocorrendo acionamento isolado do tempo de verde para cada semáforo. As avenidas obedecem a uma característica de fluxo mostrada na figura 5.2, que nos será base para a determinação das funções de pertinência de entrada e saída *fuzzy*. Este sistema não é real, sendo criado apenas para fins de aplicação no controle *fuzzy*, mas descreve a forma de variação de demanda de automóveis nas avenidas baseando-se em sistemas reais, caracterizando o tráfego conforme o horário do dia.

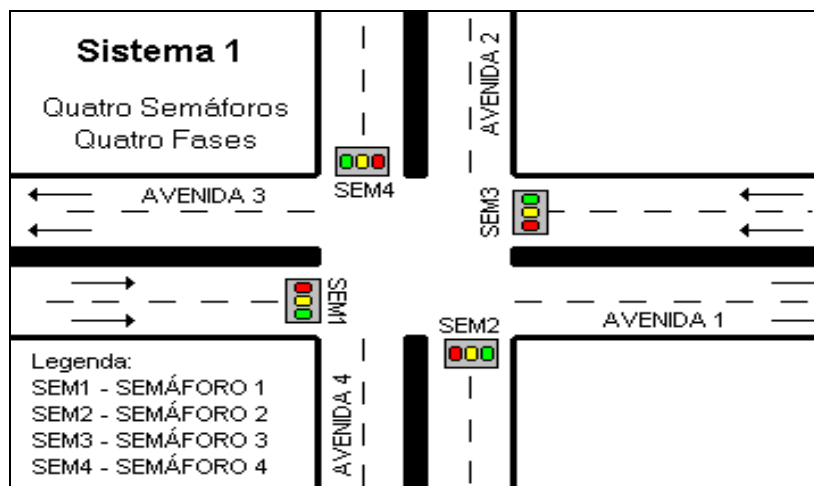


Fig. 5.1 - Sistema 1 de Controle de Trânsito com PCFT

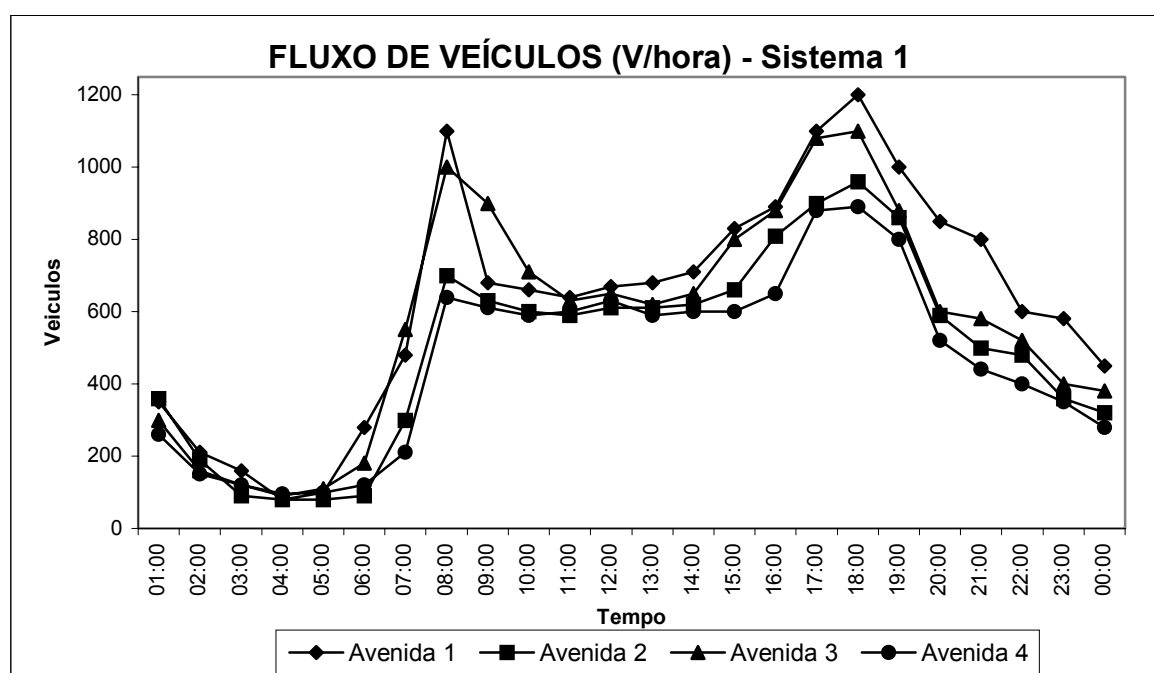


Fig. 5.2 - Característica de Fluxo de Veículos para Sistema 1

Como podemos observar, existe uma diferença entre os fluxos de veículos para cada avenida, sendo as avenidas 1 e 3 as principais e as avenidas 2 e 4 as secundárias. Estes fluxos variam conforme o período do dia e conforme a demanda que cada avenida possui. No anexo A.1.1, encontramos a tabela A.1 com todos valores de fluxo para cada avenida durante cada hora do dia. A análise dos dados de fluxo nos darão a base para determinar os conjuntos *fuzzy*. Os dados de fluxo são demonstrados em veículos por hora (V/h) e veículos por minuto (V/min.).

Primeiramente analisamos através do PCFT um sistema de controle de trânsito que pudesse variar o tempo de sinal verde nos semáforos conforme a

demanda de veículos nas avenidas. Para isto, como já comentado, se espera a presença de sensores nestas avenidas para fim de contar o número de automóveis que se encontram nestas antes de acionar o sinal verde. Para este caso, foi configurada diferentes funções de pertinência, que podemos analisar melhor no exemplo dado pelo anexo A.1.2 (figuras A.1 e A.2), onde está representadas as funções para avenida 1 deste sistema. Na figura 5.3 a seguir é demonstrado o sistema *fuzzy* geral:

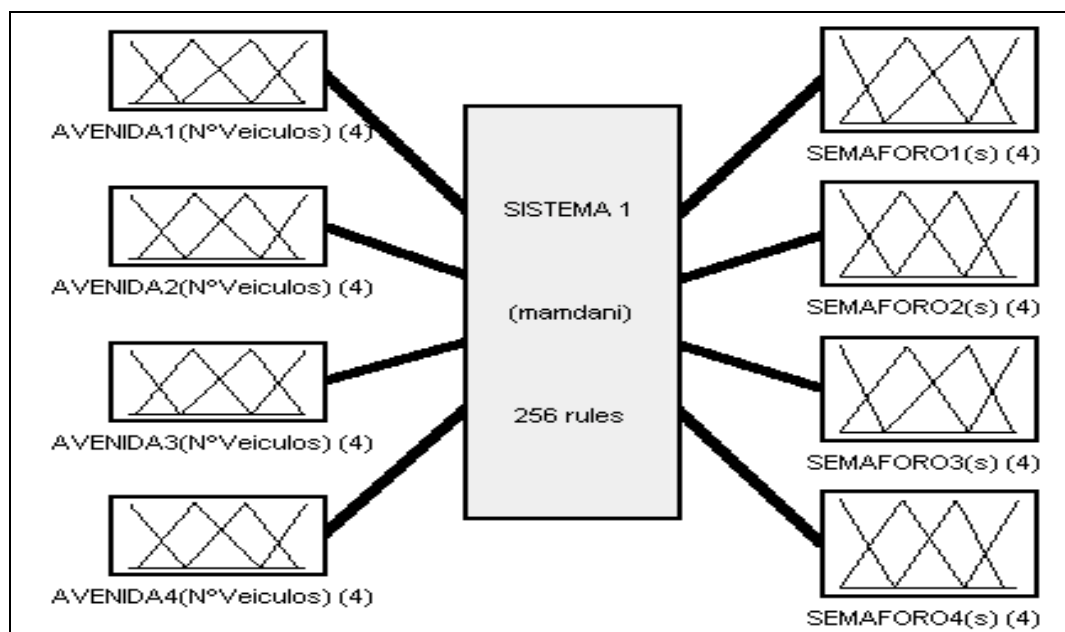


Fig. 5.3 – Entradas e Saídas *Fuzzy* para o Sistema 1 com Sensor

O sistema conta com quatro entradas (cada qual com quatro conjuntos *fuzzy*) que recebem o número de veículos em cada avenida. Os nomes das funções *fuzzy* não receberam acentos, pois no software não foi aceita este tipo de *caractere*, portanto não aqui são colocados os nomes fiéis aos desenvolvidos no *Matlab®*. Os conjuntos são descritos abaixo conforme foram implementados:

- Funções de Pertinência da Entrada '**AVENIDA1**':

Range = 1 a 25 veículos.

Nome do Conjunto	Forma da Função	Domínio
POUCO	Linear Decrescente	[1 – 8]
MEDIO inf	Triangular	[2 – 9,5 – 17,5]
MEDIO sup	Triangular	[8 – 17,5 – 24,5]
BASTANTE	Linear Crescente	[17,5 - 25]

Para este caso, como forma de exemplo, podemos então descrever as funções mais detalhadamente abaixo:

$$\text{POUCO} = \begin{cases} 0 & \text{se } X > 8 \\ (8 - X)/(8 - 1) & \text{se } 1 < X \leq 8 \end{cases}$$

$$\text{MEDIO inf} = \begin{cases} 0 & \text{se } X \leq 2 \\ 1 - (9,5 - X)/(9,5 - 2) & \text{se } 2 < X \leq 9,5 \\ (17,5 - X)/(17,5 - 9,5) & \text{se } 9,5 < X \leq 17,5 \\ 0 & \text{se } X > 17,5 \end{cases}$$

$$\text{MEDIO sup} = \begin{cases} 0 & \text{se } X \leq 8 \\ 1 - (17,5 - X)/(17,5 - 8) & \text{se } 8 < X \leq 17,5 \\ (24,5 - X)/(24,5 - 17,5) & \text{se } 17,5 < X \leq 24,5 \\ 0 & \text{se } X > 24,5 \end{cases}$$

$$\text{BASTANTE} = \begin{cases} 0 & \text{se } X < 17,5 \\ 1 - (25 - X)/(25 - 17,5) & \text{se } 17,5 < X \leq 25 \end{cases}$$

- Funções de Pertinência da Entrada '**AVENIDA2**':

Range = 1 a 20 veículos.

Nome do Conjunto	Forma da Função	Domínio
POUCO	Linear Decrescente	[1 – 7]
MEDIO inf	Triangular	[2 – 8 - 15]
MEDIO sup	Triangular	[7 - 13,5 - 19]
BASTANTE	Linear Crescente	[15 - 20]

A entrada '**AVENIDA3**' se equivale a entrada '**AVENIDA1**' assim como a entrada '**AVENIDA4**' possui as mesmas funções de pertinência que a '**AVENIDA2**'. Apesar de possuírem fluxos diferentes, as avenidas 1 e 3 e também as avenidas 2 e 4 possuem fluxos semelhantes e optamos executar o controle fuzzy como se fossem iguais.

Os parâmetros que foram utilizados para a determinação do intervalo das funções foram os valores de fluxo de veículos por minuto nas avenidas. Por exemplo, para a determinação do intervalo de 'AVENIDA1' foi observado o maior valor de fluxo por hora para a avenida 1 (18:00h), que é 1200 (V/h), e efetuado uma divisão por sessenta minutos, que nos dá um valor de 20 veículos por minuto. Claro que este é um valor que varia durante o período de 60 segundos, tanto para mais como para menos, sendo que é sempre melhor avaliar o pior caso. Como se trata de dados fictícios, podemos "jogar" uma margem para cima de mais cinco veículos por minuto, chegando em um intervalo de 25 veículos por minuto nesta avenida. Este procedimento foi realizado em todos os casos simulados pelo PCFT.

O sistema também conta com quatro saídas (cada qual com cinco conjuntos *fuzzy*) que, após a *fuzzificação* e a *defuzzificação*, fornece o tempo de verde para cada avenida ('SEMAFORO1', 'SEMAFORO2', 'SEMAFORO3' e 'SEMAFORO4'). Os conjuntos são descritos abaixo conforme foram implementados no software *Matlab®*:

- Funções de Pertinência da Saída '**SEMAFORO1**':

Range = 3 a 35 segundos.

Nome do Conjunto	Forma da Função	Domínio
POUCO	Linear Decrescente	[3 – 11]
MEDIO inf	Triangular	[3,5 – 15 – 26]
MEDIO sup	Triangular	[11 – 26 – 34]
ALTO	Linear Crescente	[26 - 35]

Podemos então descrever as funções mais detalhadamente abaixo:

$$\text{POUCO} = \begin{cases} 0 & \text{se } X > 11 \\ (11 - X)/(11 - 3) & \text{se } 3 < X \leq 11 \end{cases}$$

$$\text{MEDIO inf} = \begin{cases} 0 & \text{se } X \leq 3,5 \\ 1 - (15 - X)/(15 - 3,5) & \text{se } 3,5 < X \leq 15 \\ (26 - X)/(26 - 15) & \text{se } 15 < X \leq 26 \\ 0 & \text{se } X > 26 \end{cases}$$

$$\text{MEDIO sup} = \begin{cases} 0 & \text{se } X \leq 11 \\ 1 - (26 - X)/(26 - 11) & \text{se } 11 < X \leq 26 \\ (34 - X)/(34 - 26) & \text{se } 26 < X \leq 34 \\ 0 & \text{se } X > 34 \end{cases}$$

$$\text{ALTO} = \begin{cases} 0 & \text{se } X < 26 \\ 1 - (35 - X)/(35 - 26) & \text{se } 26 < X \leq 35 \end{cases}$$

- Funções de Pertinência da Saída '**SEMAFORO2**':

Range = 3 a 26 segundos.

Nome do Conjunto	Forma da Função	Domínio
POUCO	Linear Decrescente	[3 – 10]
MEDIO inf	Triangular	[3,5 – 11 – 19]
MEDIO sup	Triangular	[10 – 18 – 24]
ALTO	Linear Crescente	[19 - 26]

A saída '**SEMAFORO3**' se equivale a saída '**SEMAFORO1**' por possuírem demanda de fluxo de veículos nas avenidas muito semelhantes. Da mesma forma, a saída '**SEMAFORO4**' possui as mesmas funções de pertinência que a '**SEMAFORO2**'.

As regras *fuzzy* para o sistema 1 totalizaram 256, sendo que foram suficientes para que o *Matlab®* conseguisse receber os quatro valores de entrada e fornecesse os quatro valores de saída correspondentes aos tempos de verde dos semáforos das referidas avenidas ('SEMAFORO1', 'SEMAFORO2', 'SEMAFORO3' e 'SEMAFORO4'). O conjunto destas regras foi baseado no seguinte princípio:

SE '**AVENIDA1**' é POUCO, ENTÃO '**SEMÁFORO1**' é BAIXO.

SE '**AVENIDA1**' é MEDIO inf, ENTÃO '**SEMÁFORO1**' é MEDIO inf.

SE '**AVENIDA1**' é MEDIO sup, ENTÃO '**SEMÁFORO1**' é MEDIO sup.

SE '**AVENIDA1**' é BASTANTE, ENTÃO '**SEMÁFORO1**' é ALTO.

As regras possuem o objetivo de fazer com que à medida que o fluxo de veículos aumente nas avenidas, o tempo de verde dos semáforos também aumente, dentro de uma proporção regulada por estas regras e pelos conjuntos *fuzzy*.

O PCFT também executa, não somente para o sistema 1, mas para todos os outros sistemas demonstrados neste trabalho, um modelo de controle de trânsito com tempo pré-fixado, ou seja, o tempo de ciclo dos semáforos varia conforme o horário do dia. Porém, como já visto, em um sistema convencional esta mudança ocorre bruscamente de um tempo para o outro,

podendo causar atraso a motoristas. Para isto foi implantado um sistema *fuzzy* no PCFT que recebe como entrada o período do dia, em hora e minutos, sendo a saída o tempo de verde de cada semáforo. Assim, as avenidas não necessitam de sensores para identificação do fluxo de veículos, pois o tempo de verde varia conforme a característica de fluxo de veículos do sistema 1, possuindo uma entrada e quatro saídas, conforme podemos verificar na figura 5.4:

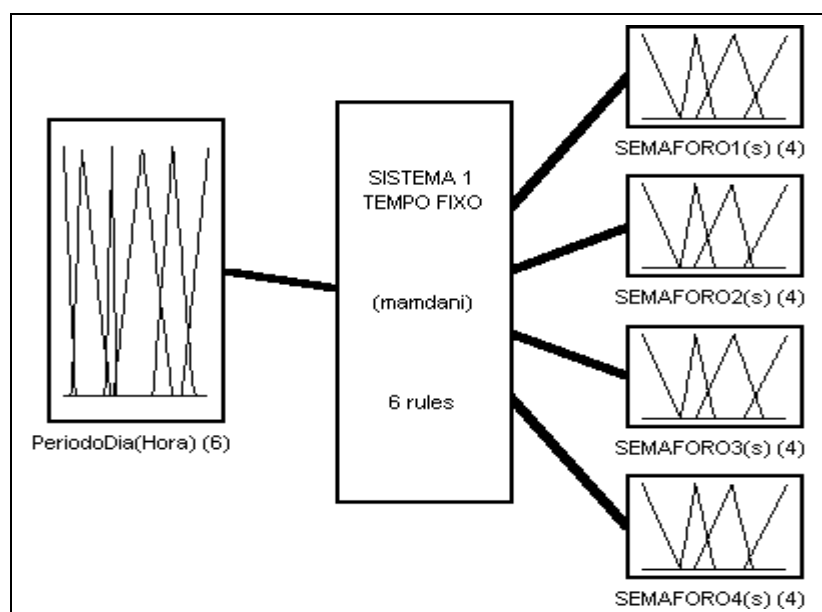


Fig. 5.4 - Entrada e Saídas *Fuzzy* para o Sistema 1 com Tempo Fixo

É importante salientar que esta simulação do PCFT não seria algo muito viável em algumas grandes cidades, onde a característica de fluxo varia de dia para dia da semana. Como exemplo, podemos dizer que segunda-feira possui fluxo diferente de sexta-feira, pois é dia em que as pessoas se deslocam para outras localidades para passar o fim de semana. Porém, se existir um bom estudo sobre o fluxo, é possível implanta-lo em interseções isoladas.

As funções de pertinência deste sistema com o tempo de verde pré-fixado foi descrita da seguinte forma, sendo que a entrada “PeriodoDia” foi utilizada para os sistemas 1 e 2 analisados, servindo como referencia para descrições posteriores:

- Funções de Pertinência da Entrada **PeriodoDia**:

Range = 0 a 24 Horas.

Nome do Conjunto	Forma da Função	Domínio
M NOITE	Linear Decrescente	[0 – 2]
MADRUGADA	Triangular	[1,3 – 3 – 7,8]
PICO1	Triangular	[6,85 – 8 – 8,7]
MANHÃ	Triangular	[8,2 – 13 – 18]
PICO2	Triangular	[14,8 – 18 – 21,5]
NOITE	Linear Crescente	[19,5 – 24]

- Funções de Pertinência da Saída '**SEMAFORO1**':

Range = 5 a 35 Segundos.

Nome do Conjunto	Forma da Função	Domínio
BAIXO	Linear Decrescente	[5 – 13]
MEDIO	Triangular	[13 – 16 – 20]
MEDIO sup	Triangular	[16 – 24 – 30]
ALTO	Linear Crescente	[26 – 35]

- Funções de Pertinência da Saída '**SEMAFORO2**':

Range = 5 a 26 Segundos.

Nome do Conjunto	Forma da Função	Domínio
BAIXO	Linear Decrescente	[5 – 10,5]
MEDIO	Triangular	[10,5 – 12,7 – 15,5]
MEDIO sup	Triangular	[12,5 – 18 – 21]
ALTO	Linear Crescente	[19,7 – 26]

Os semáforos 'SEMAFORO3' e 'SEMAFORO4' são respectivamente iguais aos semáforos descritos acima 'SEMAFORO1' e 'SEMAFORO2'. As regras para este sistema são muito simples e de fácil execução, não exigindo muito processamento do hardware. Estas regras são as mesmas utilizadas para o sistema 2 e sistema 3, totalizando um conjunto de seis regras descritas abaixo:

- SE** *PeriodoDia* é M NOITE, **ENTÃO** *SEMAFORO1* é MEDIO, *SEMAFORO2* é MEDIO, *SEMAFORO3* é MEDIO e *SEMAFORO4* é MEDIO.
- SE** *PeriodoDia* é MADRUGA, **ENTÃO** *SEMAFORO1* é BAIXO, *SEMAFORO2* é BAIXO, *SEMAFORO3* é BAIXO e *SEMAFORO4* é BAIXO.

- **SE** *PeriodoDia* é PICO1, **ENTÃO** *SEMAFORO1* é MEDIO sup, *SEMAFORO2* é MEDIO sup, *SEMAFORO3* é MEDIO sup e *SEMAFORO4* é MEDIO sup.
- **SE** *PeriodoDia* é MANHA, **ENTÃO** *SEMAFORO1* é MEDIO, *SEMAFORO2* é MEDIO, *SEMAFORO3* é MEDIO e *SEMAFORO4* é MEDIO.
- **SE** *PeriodoDia* é PICO2, **ENTÃO** *SEMAFORO1* é ALTO, *SEMAFORO2* é ALTO, *SEMAFORO3* é ALTO e *SEMAFORO4* é ALTO.
- **SE** *PeriodoDia* é NOITE, **ENTÃO** *SEMAFORO1* é MEDIO, *SEMAFORO2* é MEDIO, *SEMAFORO3* é MEDIO e *SEMAFORO4* é MEDIO.

5.3.2 Sistema 2

No segundo caso, tratamos de uma interseção com oito semáforos e quatro fases, conforme figura 5.5, sendo que neste sistema 2 analisado pelo PCFT, possuímos uma interseção com quatro avenidas com diferentes fluxos de veículos que resulta em diferentes tempos de verde nos semáforos. A diferença para o primeiro sistema analisado é que aqui existem oito sensores que fornecem valores de fluxo de veículos nas avenidas. O funcionamento deste tipo de interseção funciona com o princípio de acionamento de dois semáforos por vez: os semáforos dos sensores 1-5 e 3-7 (*sav_1-5* e *sav_3-7*) são acionados para os motoristas que estão no lado esquerdo de cada avenida, sendo permitido para estes apenas conduzirem seu veículos para o sentido esquerdo, sendo que os semáforos S2-S6 e S4-S8 são acionados para os motoristas que ocupam o restante das avenida e pretendem seguir no mesmo sentido que trafegavam ou se movimentar para a direita, entrando em outra avenida. A figura 5.6 nos demonstra melhor o funcionamento do sistema 2 analisado pelo PCFT.

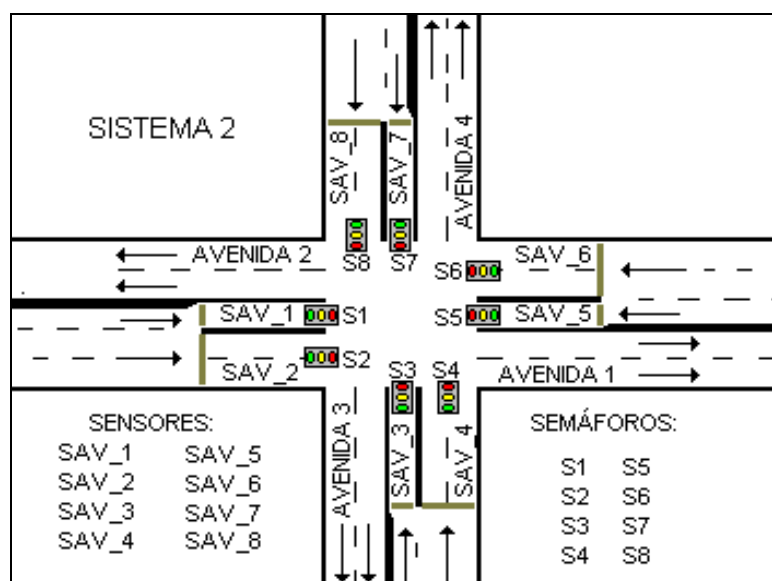


Fig. 5.5 - Sistema 2 de Controle de Tráfego com PCFT

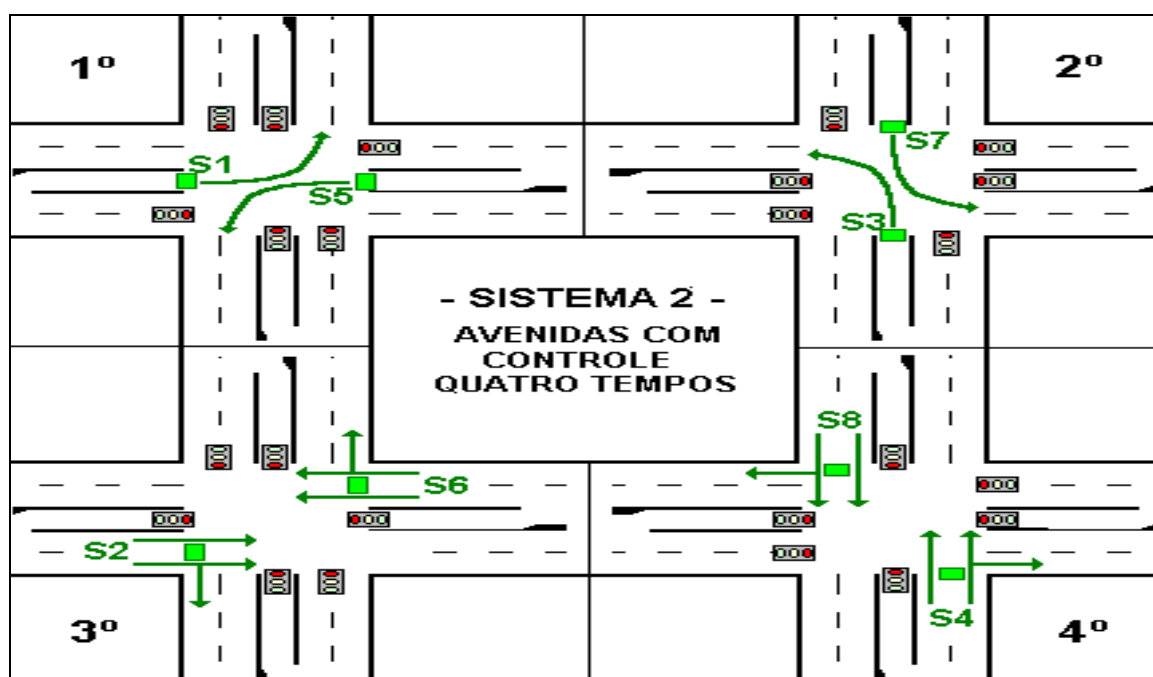


Fig. 5.6 – Modo de Funcionamento dos Semáforos do Sistema 2

As avenidas do sistema 2 obedecem a uma característica de fluxo mostrada nas figuras 5.7 e 5.8, que nos será base para a determinação das funções de pertinência de entrada e saída *fuzzy*. Este sistema, assim como o primeiro modelo apresentado, não é real, sendo criado apenas para fins de aplicação no controle *fuzzy*, mas descreve a forma de variação de demanda de automóveis nas avenidas baseando-se em sistemas reais, caracterizando o tráfego conforme o horário do dia.

Existe uma diferença entre os fluxos de veículos para cada avenida, sendo as avenidas 1 e 2 as principais e as avenidas 3 e 4 as secundárias. Estes fluxos variam conforme o período do dia e conforme a demanda que cada avenida possui. No anexo A.2.1, encontramos a tabela A.2 com todos valores de fluxo para cada avenida durante cada hora do dia (em V/h e V/min.). A análise dos dados de fluxo nos dão a base para determinar os conjuntos *fuzzy*. Apesar da semelhança entre alguns fluxos de umas avenidas, aqui não se optou por igualar as funções de pertinência *fuzzy* para controlar os tempos das avenidas, ao contrário do que foi realizado no sistema 1.

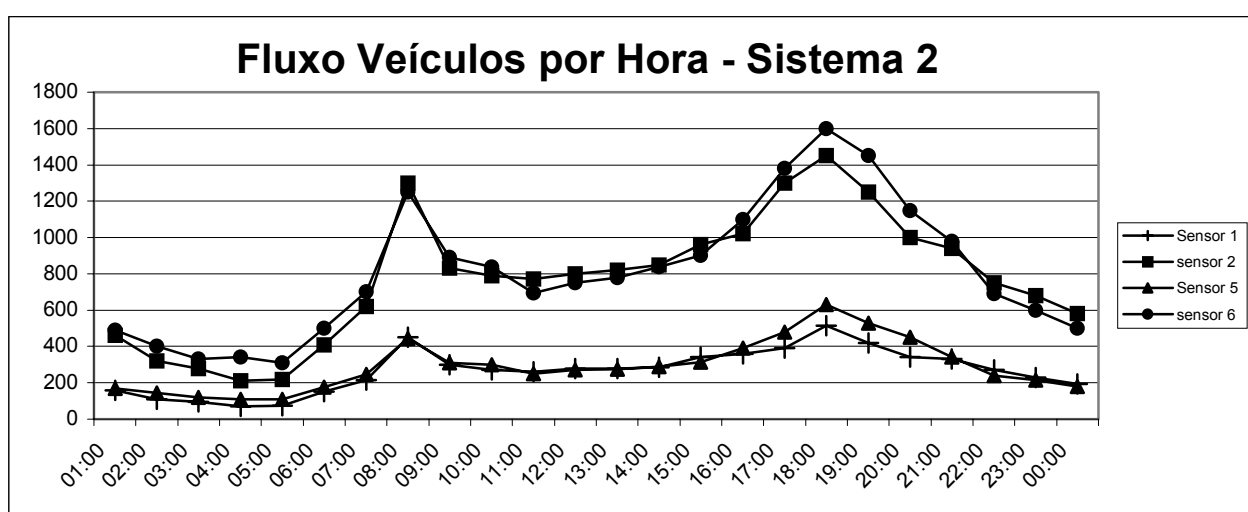


Fig. 5.7 - Característica de Fluxo de Veículos para Sistema 2 para avenidas 1 e 2

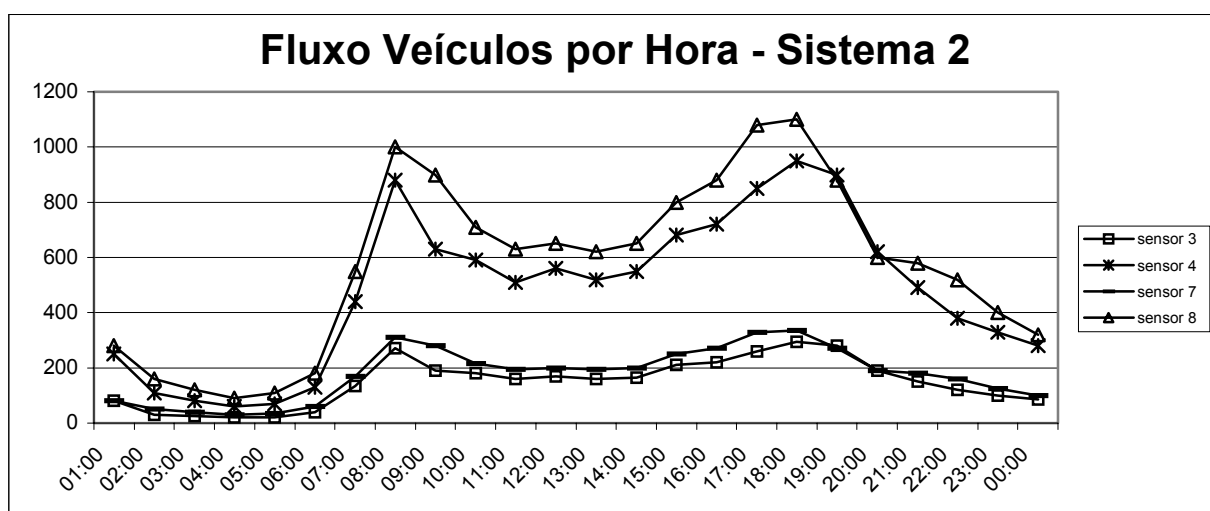


Fig. 5.8 - Característica de Fluxo de Veículos para Sistema 2 para avenidas 3 e 4

Aqui neste caso 2, também se analisou um sistema de controle de trânsito que pudesse variar o tempo de sinal verde nos semáforos conforme a

demanda de veículos nas avenidas e um outro com tempos fixos, variando conforme o período do dia. Para a primeira situação, foi configurada diferentes funções de pertinência, que podem ser melhor analisados no exemplo do anexo A.2.2. O sistema *fuzzy* geral pode ser visto na figura 5.9:

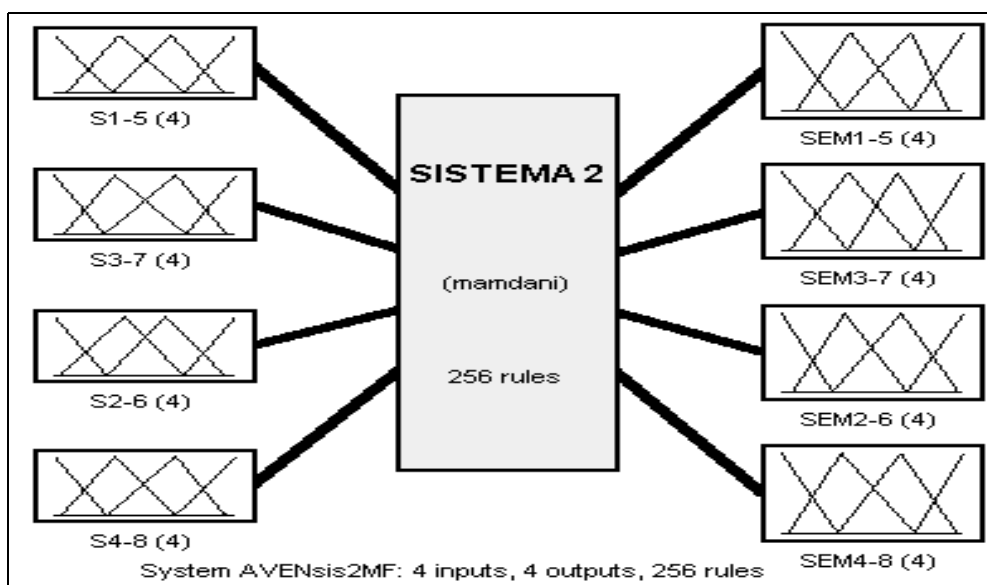


Fig. 5.9 – Entradas e Saídas *Fuzzy* para o Sistema 2 com Sensor

Apesar de possuir oito sensores de contagem de veículos (um para cada semáforo), o sistema *fuzzy* possui apenas quatro entradas (cada qual com quatro conjuntos *fuzzy*). Isto porque sempre se acionam pares de semáforos, sendo preciso verificar nestes pares qual o semáforo que possui a maior demanda de veículos do momento, sendo que este valor é que será enviado ao sistema *fuzzy* como entrada *crisp*. Os conjuntos são descritos abaixo conforme foram implementados no software *Matlab*®:

- Funções de Pertinência da Entrada **Avenidas1-5:**

Range = 1 a 15 veículos.

Nome do Conjunto	Forma da Função	Domínio
POUCO	Linear Decrescente	[1 – 5,5]
MEDIO inf	Triangular	[2 – 6 – 11]
MEDIO sup	Triangular	[5,5 – 10 – 14]
BASTANTE	Linear Crescente	[11 – 15]

Para a entrada *fuzzy* “Avenida1-5”, podemos descrever as funções mais detalhadamente abaixo:

$$\text{POUCO} = \begin{cases} 0 & \text{se } X > 5,5 \\ (5,5 - X)/(5,5 - 1) & \text{se } 1 < X \leq 5,5 \end{cases}$$

$$\text{MEDIO inf} = \begin{cases} 0 & \text{se } X \leq 2 \\ 1 - (6 - X)/(6 - 2) & \text{se } 2 < X \leq 6 \\ (11 - X)/(11 - 6) & \text{se } 6 < X \leq 11 \\ 0 & \text{se } X > 11 \end{cases}$$

$$\text{MEDIO sup} = \begin{cases} 0 & \text{se } X \leq 5,5 \\ 1 - (10 - X)/(10 - 5,5) & \text{se } 5,5 < X \leq 10 \\ (14 - X)/(14 - 10) & \text{se } 10 < X \leq 14 \\ 0 & \text{se } X > 14 \end{cases}$$

$$\text{BASTANTE} = \begin{cases} 0 & \text{se } X < 11 \\ 1 - (15 - X)/(15 - 11) & \text{se } 11 < X \leq 15 \end{cases}$$

- Funções de Pertinência da Entrada **Avenidas3-7**:

Range = 1 a 10 veículos.

Nome do Conjunto	Forma da Função	Domínio
POUCO	Linear Decrescente	[1 – 3,5]
MEDIO inf	Triangular	[1,5 – 4 – 7,5]
MEDIO sup	Triangular	[3,5 – 7 – 9,5]
BASTANTE	Linear Crescente	[7,5 – 10]

- Funções de Pertinência da Entrada **Avenidas2-6**:

Range = 1 a 32 veículos.

Nome do Conjunto	Forma da Função	Domínio
POUCO	Linear Decrescente	[1 – 10]
MEDIO inf	Triangular	[2 – 13 – 23]
MEDIO sup	Triangular	[10 – 20 – 30]
BASTANTE	Linear Crescente	[23 – 32]

- Funções de Pertinência da Entrada **Avenidas4-8**:

Range = 1 a 25 veículos.

Nome do Conjunto	Forma da Função	Domínio
POUCO	Linear Decrescente	[1 – 8]
MEDIO inf	Triangular	[2 – 9 – 17]
MEDIO sup	Triangular	[8 – 16 – 23,5]
BASTANTE	Linear Crescente	[17 – 25]

O sistema também conta com quatro saídas (cada qual com quatro conjuntos *fuzzy*) que, após a *fuzzificação* e a *defuzzificação*, fornece o tempo de verde para cada avenida (SEMÁFORO1-5, SEMÁFORO3-7, SEMÁFORO2-

6 e SEMÁFORO4-8). Os conjuntos são descritos abaixo conforme foram implementados no software *Matlab*®:

- Funções de Pertinência da Saída **SEMÁFORO1-5**:

Range = 4 a 16 segundos.

Nome do Conjunto	Forma da Função	Domínio
POUCO	Linear Decrescente	[4 - 8]
MEDIO inf	Triangular	[5 – 8,5 – 12,5]
MEDIO sup	Triangular	[8 – 12,5 – 15]
ALTO	Linear Crescente	[12,5 - 16]

Para saída *fuzzy* “SEMAFORO1-5”, podemos descrever as funções mais detalhadamente abaixo:

$$\text{POUCO} = \begin{cases} 0 & \text{se } X > 8 \\ (8 - X)/(8 - 4) & \text{se } 4 < X \leq 8 \end{cases}$$

$$\text{MEDIO inf} = \begin{cases} 0 & \text{se } X \leq 5 \\ 1 - (8,5 - X)/(8,5 - 5) & \text{se } 5 < X \leq 8,5 \\ (12,5 - X)/(12,5 - 8,5) & \text{se } 8,5 < X \leq 12,5 \\ 0 & \text{se } X > 12,5 \end{cases}$$

$$\text{MEDIO sup} = \begin{cases} 0 & \text{se } X \leq 8 \\ 1 - (12,5 - X)/(12,5 - 8) & \text{se } 8 < X \leq 12,5 \\ (15 - X)/(15 - 12,5) & \text{se } 12,5 < X \leq 15 \\ 0 & \text{se } X > 15 \end{cases}$$

$$\text{ALTO} = \begin{cases} 0 & \text{se } X < 12,5 \\ 1 - (16 - X)/(16 - 12,5) & \text{se } 12,5 < X \leq 16 \end{cases}$$

- Funções de Pertinência da Saída **SEMÁFORO3-7**:

Range = 4 a 15 segundos.

Nome do Conjunto	Forma da Função	Domínio
POUCO	Linear Decrescente	[4 – 8]
MEDIO inf	Triangular	[4,5 – 8 – 12]
MEDIO sup	Triangular	[8 – 11 – 14]
ALTO	Linear Crescente	[12 – 15]

- Funções de Pertinência da Saída **SEMÁFORO2-6**:

Range = 4 a 36 segundos.

Nome do Conjunto	Forma da Função	Domínio
POUCO	Linear Decrescente	[4 – 10,5]
MEDIO inf	Triangular	[6– 15 – 26]
MEDIO sup	Triangular	[11 – 21 – 29]
ALTO	Linear Crescente	[26 - 36]

- Funções de Pertinência da Saída **SEMÁFORO4-8**:

Range = 4 a 30 segundos.

Nome do Conjunto	Forma da Função	Domínio
POUCO	Linear Decrescente	[4 – 10]
MEDIO inf	Triangular	[5– 12,5 – 23]
MEDIO sup	Triangular	[11 – 21 – 29]
ALTO	Linear Crescente	[23 - 30]

O conjunto de regras para este sistema totalizou 256, sendo que os objetivos e os princípios da construção destas regras é o mesmo do sistema 1, ou seja, satisfazer a condição de que quando o fluxo de veículos aumenta nas avenidas, o tempo de verde também aumenta nos semáforos.

Assim como no primeiro sistema analisado pelo PCFT, aqui no sistema 2 foi também realizado um modelo de controle de trânsito com um tempo pré-fixado, não necessitando o uso de sensores nas avenidas. O modo de funcionamento é igual ao do sistema 1 com tempo fixo, ou seja, existe um conjunto *fuzzy* de entrada que recebe um valor *crisp* que representa o período do dia (em horas) e quatro saídas que representa os quatro acionamentos de semáforos (SEMÁFORO1-5, SEMÁFORO3-7, SEMÁFORO2-6 e SEMÁFORO4-8).

A entrada do sistema 2 com tempo fixo é a mesma apresentada para o sistema 1, recebendo o nome de “PeríodoDia” (ver anexo A.1.2), variando de 0 a 24 horas. O que muda aqui é as funções de pertinência de saída do sistema analisado, podendo ser verificado abaixo:

- Funções de Pertinência da Saída **SEMÁFORO1-5:**

Range = 5 a 16 Segundos.

Nome do Conjunto	Forma da Função	Domínio
BAIXO	Linear Decrescente	[5 – 8]
MEDIO	Triangular	[7 – 9 – 10,5]
MEDIO sup	Triangular	[9 - 12 - 14]
ALTO	Linear Crescente	[12,7 - 16]

- Funções de Pertinência da Saída **SEMÁFORO3-7:**

Range = 5 a 14 Segundos.

Nome do Conjunto	Forma da Função	Domínio
BAIXO	Linear Decrescente	[5 – 7,5]
MEDIO	Triangular	[6,9 – 8,3 – 9,5]
MEDIO sup	Triangular	[8,9 – 10,5 - 12]
ALTO	Linear Crescente	[11,3 - 14]

- Funções de Pertinência da Saída **SEMÁFORO2-6:**

Range = 5 a 40 Segundos.

Nome do Conjunto	Forma da Função	Domínio
BAIXO	Linear Decrescente	[5 – 15]
MEDIO	Triangular	[12 – 17,8 – 22,5]
MEDIO sup	Triangular	[17,8 – 27,2 – 34,8]
ALTO	Linear Crescente	[30,9 - 40]

- Funções de Pertinência da Saída **SEMÁFORO4-8:**

Range = 5 a 32 Segundos.

Nome do Conjunto	Forma da Função	Domínio
BAIXO	Linear Decrescente	[5 – 13]
MEDIO	Triangular	[10 – 14,9 – 18,5]
MEDIO sup	Triangular	[14,9 – 22 – 25,7]
ALTO	Linear Crescente	[23,9 - 32]

As regras para este sistema são exatamente iguais ao outro sistema analisado (Sistema 1), totalizando seis, sendo que segue o mesmo princípio de tentar fazer com que os tempos de verde aumentem ou diminuam na mesma proporção que um estudo do fluxo tráfego pré-realizado determinou.

5.3.3 Sistema 3

No terceiro possuímos uma interseção com três avenidas, conforme figura 5.10. O terceiro sistema analisado pelo PCFT se trata de um caso extraído da referência [16], que é uma interseção com três semáforos (SEMÁFORO1, SEMÁFORO2 e SEMÁFORO3). As rodovias da Avenida Waldemar Paschoal (WP) e Avenida Monsenhor João Ladeira (JL) possuem semáforos que são acionados simultaneamente, o qual chamamos de “SEM1-2”, sendo as avenidas com maior fluxo de veículos. A Avenida Mal. Carmona (MC) possui menor fluxo e possui um semáforo acionado isoladamente dos demais. A característica do volume de fluxo pode ser verificada na tabela 5.1:

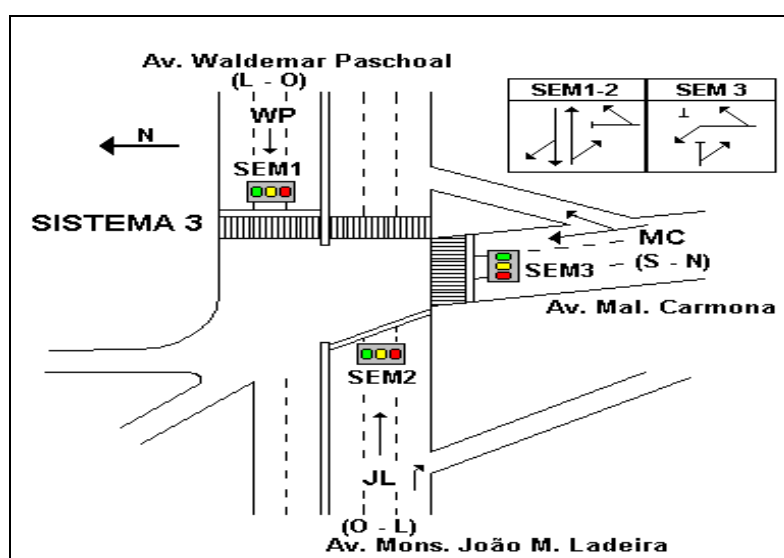


Fig. 5.10 - Sistema 3 de Controle de Tráfego com PCFT

Período	WP (L – O) - V/h	JL (O – L) - V/h	MC (S – N) - V/h
Pico da Manhã			
06:30 até 09:00 h	2769	2100	976
09:00 até 11:00 h	2237	1619	812
Pico do Almoço			
11:00 até 14:30 h	2529	1486	947
14:30 até 16:00 h	1986	1252	800
Pico da Tarde			
16:00 até 20:00 h	3435	2215	1051
20:00 até 21:00 h	1370	1262	463
21:00 até 00:00 h	1170	953	713

Tabela 5.1 – Fluxo de Veículos para as Avenidas do Sistema 3

Baseado nestes dados foi construído um gráfico tentando representar o volume de fluxo das três avenidas (figura 5.11).

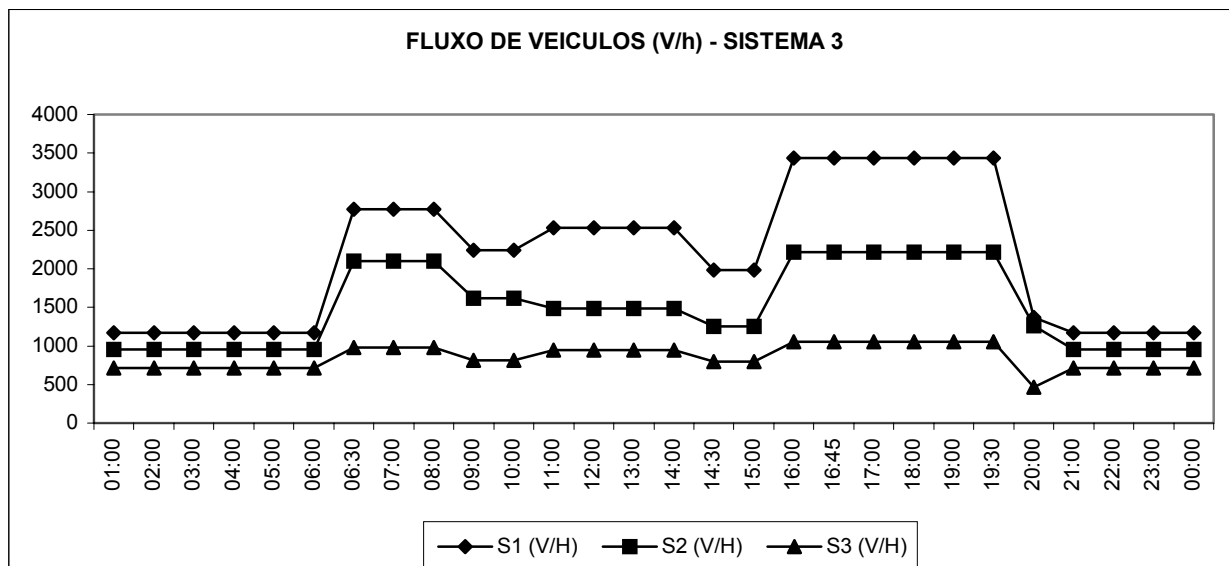


Fig. 5.11 - Característica de Fluxo de Veículos do Sistema 2

Para estas avenidas existem dois tipos de acionamentos de semáforo (SEMÁFORO1-2 e SEMÁFORO3), sendo que os tempos de verde variam o conforme o período do dia. Abaixo se encontra como ocorre a variação de ciclo nas avenidas [16] pelo sistema atual:

Plano Intervalo	de	Tempo de Ciclo (s)	Tempo de Verde SEMÁFORO1-2	Tempo de Verde SEMÁFORO3
05:00 até 06:30 h		60	33	17
06:30 até 09:00 h		85	53	22
09:00 até 11:00 h		60	33	17
11:00 até 14:30 h		70	40	20
14:30 até 16:00 h		65	33	22
16:00 até 16:45 h		90	56	24
16:45 até 19:30 h		105	70	25
19:30 até 20:00 h		90	51	29
20:00 até 21:00 h		60	33	17
21:00 até 00:00 h		55	30	15

Tabela 5.2 – Tempo de Verde e Ciclo Total das Avenidas do Sistema 3

Esta avenida possui um atuador eletrônico que executa a variação do tempo de ciclo. Isto trás vantagens ao sistema de tráfego, porém existem problemas de atraso que podem ser verificados pelas próprias mudanças

bruscas do sinal de verde de um período para o outro. Por exemplo: às 19:59 h o tempo de verde para SEMÁFORO3 é de 29 segundos, sendo que um minuto depois (20:00h) o seu tempo de verde passa a ser 17 segundos.

Com isto, foi analisado o referido sistema 3, executando um controle *fuzzy* para este e posteriormente realizado uma aplicação no PCFT. O objetivo e os métodos de determinação das funções de pertinência são os mesmos adotados nos sistemas 1 e 2. As análises basearam-se em controlar o trânsito de forma a possuir sensores para contagem de veículos e também em possuir um sistema que tenha tempos pré-determinados, como foi executado nas situações anteriores.

Na primeira análise, o sistema *fuzzy* conta com três entradas que representam o fluxo de veículos nas avenidas e duas saídas que representam o tempo de verde dos semáforos SEMÁFORO1-2 e SEMÁFORO3. O sistema *fuzzy* geral pode ser visto na figura 5.12.

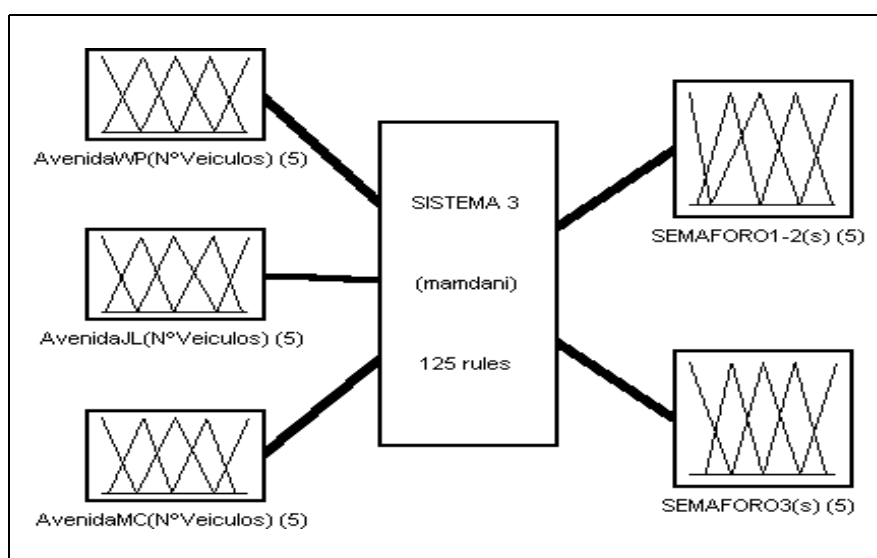


Fig. 5.12 – Entradas e Saídas *Fuzzy* para o Sistema 3

Os conjuntos *fuzzy* são descritos abaixo conforme foram implementados no software *Matlab*®:

- Funções de Pertinência da Entrada **AvenidaWP**:

Range = 1 a 65 veículos.

Nome do Conjunto	Forma da Função	Domínio
POUCO	Linear Decrescente	[1 – 18]
MEDIO inf	Triangular	[2 – 19 – 33]
MEDIO	Triangular	[18 – 33 – 50]
MEDIO sup	Triangular	[34 – 48 – 63]
BASTANTE	Linear Crescente	[50 - 65]

Para A entrada *fuzzy* “AvenidaWP”, podemos descrever as funções mais detalhadamente abaixo, como forma de exemplo para este sistema:

$$\text{POUCO} = \begin{cases} 0 & \text{se } X > 18 \\ (18 - X)/(18 - 1) & \text{se } 1 < X \leq 18 \end{cases}$$

$$\text{MEDIO inf} = \begin{cases} 0 & \text{se } X \leq 2 \\ 1 - (19 - X)/(19 - 2) & \text{se } 2 < X \leq 19 \\ (33 - X)/(33 - 19) & \text{se } 19 < X \leq 33 \\ 0 & \text{se } X > 33 \end{cases}$$

$$\text{MEDIO} = \begin{cases} 0 & \text{se } X \leq 18 \\ 1 - (33 - X)/(33 - 18) & \text{se } 18 < X \leq 33 \\ (50 - X)/(50 - 33) & \text{se } 33 < X \leq 50 \\ 0 & \text{se } X > 50 \end{cases}$$

$$\text{MEDIO sup} = \begin{cases} 0 & \text{se } X \leq 34 \\ 1 - (48 - X)/(48 - 34) & \text{se } 34 < X \leq 48 \\ (63 - X)/(63 - 48) & \text{se } 48 < X \leq 63 \\ 0 & \text{se } X > 63 \end{cases}$$

$$\text{BASTANTE} = \begin{cases} 0 & \text{se } X < 50 \\ 1 - (65 - X)/(65 - 50) & \text{se } 50 < X \leq 65 \end{cases}$$

- Funções de Pertinência da Entrada **AvenidaJL**:

Range = 1 a 42 veículos.

Nome do Conjunto	Forma da Função	Domínio
POUCO	Linear Decrescente	[1 – 11]
MEDIO inf	Triangular	[2 – 12 – 21]
MEDIO	Triangular	[11 – 21 – 33]
MEDIO sup	Triangular	[21 – 32 – 40]
BASTANTE	Linear Crescente	[33 - 42]

- Funções de Pertinência da Entrada **AvenidaMC**:

Range = 1 a 22 veículos.

Nome do Conjunto	Forma da Função	Domínio
POUCO	Linear Decrescente	[1 – 6]
MEDIO inf	Triangular	[2 – 7 – 11]
MEDIO	Triangular	[6 – 11,5 – 17]
MEDIO sup	Triangular	[11 – 16 – 20]
BASTANTE	Linear Crescente	[17 - 22]

- Funções de Pertinência da Saída **SEMAFORO1-2**:

Range = 4 a 79 segundos.

Nome do Conjunto	Forma da Função	Domínio
POUCO	Linear Decrescente	[4 – 15]
MEDIO inf	Triangular	[8 – 25 – 40]
MEDIO	Triangular	[15 – 40 - 60]
MEDIO sup	Triangular	[40 – 58 – 77]
ALTO	Linear Crescente	[60 - 79]

Para a saída *fuzzy* “SEMAFORO1-2”, podemos descrever as funções mais detalhadamente abaixo, como forma de exemplo para este sistema:

$$\text{POUCO} = \begin{cases} 0 & \text{se } X > 15 \\ (15 - X)/(15 - 4) & \text{se } 4 < X \leq 15 \end{cases}$$

$$\text{MEDIO inf} = \begin{cases} 0 & \text{se } X \leq 8 \\ 1 - (25 - X)/(25 - 8) & \text{se } 8 < X \leq 25 \\ (40 - X)/(40 - 25) & \text{se } 25 < X \leq 40 \\ 0 & \text{se } X > 40 \end{cases}$$

$$\text{MEDIO} = \begin{cases} 0 & \text{se } X \leq 15 \\ 1 - (40 - X)/(40 - 15) & \text{se } 15 < X \leq 40 \\ (60 - X)/(60 - 40) & \text{se } 40 < X \leq 60 \\ 0 & \text{se } X > 60 \end{cases}$$

$$\text{MEDIO sup} = \begin{cases} 0 & \text{se } X \leq 40 \\ 1 - (58 - X)/(58 - 40) & \text{se } 40 < X \leq 58 \\ (77 - X)/(77 - 58) & \text{se } 58 < X \leq 77 \\ 0 & \text{se } X > 77 \end{cases}$$

$$\text{ALTO} = \begin{cases} 0 & \text{se } X < 60 \\ 1 - (79 - X)/(79 - 60) & \text{se } 60 < X \leq 79 \end{cases}$$

- Funções de Pertinência da Saída **SEMÁFORO3**:

Range = 4 a 32 segundos.

Nome do Conjunto	Forma da Função	Domínio
POUCO	Linear Decrescente	[4 – 12]
MEDIO inf	Triangular	[7 – 12 – 18]
MEDIO	Triangular	[12 – 18 – 25]
MEDIO sup	Triangular	[18– 24 – 30]
ALTO	Linear Crescente	[25– 32]

O conjunto de regras para este sistema 3 totalizou 125, sendo que estas regras possuem o objetivo de condicionar o referido sistema a aumentar ou diminuir seu tempo de verde dos semáforos conforme aumenta ou diminui o fluxo de veículos nas avenidas.

Também foi analisado para este sistema 3 o caso do não uso de sensores nas avenidas. O modo de funcionamento é igual ao dos outros sistemas com tempo pré-determinado, ou seja, existe um conjunto *fuzzy* de entrada que recebe um valor *crisp* que representa o período do dia (em horas) e duas saídas que representam os dois acionamentos de semáforos (SEMÁFORO1-2 e SEMÁFORO3).

A entrada do sistema 3 com tempo pré-fixado é um pouco diferente da apresentada para o sistema 1 e 2, apesar do mesmo nome (PeriodoDia), podendo ser verificado na figura 5.13, juntamente com as funções de saída:

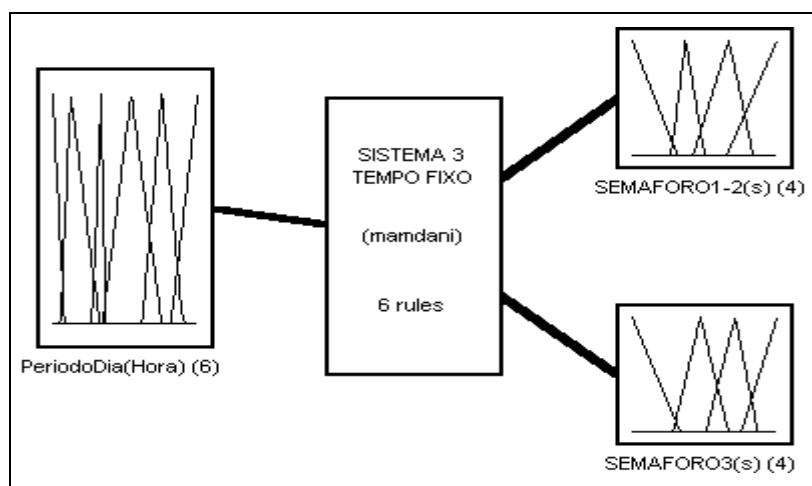


Fig. 5.13 - Entradas e Saídas *Fuzzy* para o Sistema 3 sem Sensor

- Funções de Pertinência da Entrada **PeriodoDia:**

Range = 0 a 24 Horas.

Nome do Conjunto	Forma da Função	Domínio
M NOITE	Linear Decrescente	[0 – 2]
MADRUGADA	Triangular	[1,3 – 3 – 7,8]
PICO1	Triangular	[6,5 – 8 – 8,7]
MANHÃ	Triangular	[8,2 – 13 – 18]
PICO2	Triangular	[14,8 – 18 – 21,5]
NOITE	Linear Crescente	[19,5 – 24]

- Funções de Pertinência da Saída **SEMÁFORO1-2:**

Range = 10 a 78 Segundos.

Nome do Conjunto	Forma da Função	Domínio
BAIXO	Linear Decrescente	[10 – 31,5]
MEDIO	Triangular	[28,2 – 35 – 44]
MEDIO sup	Triangular	[38,4 – 53,3 – 66,8]
ALTO	Linear Crescente	[54,1 – 78]

- Funções de Pertinência da Saída **SEMÁFORO3:**

Range = 8 a 32 Segundos.

Nome do Conjunto	Forma da Função	Domínio
BAIXO	Linear Decrescente	[8 – 16]
MEDIO	Triangular	[14,7 – 19,3 – 24]
MEDIO sup	Triangular	[20,2 – 25 – 28,8]
ALTO	Linear Crescente	[26 – 32]

As regras para este sistema são exatamente iguais aos outros sistemas analisados para um tempo pré-fixado, totalizando seis. É importante lembrar que esta análise no PCFT foi realizada sem o conhecimento do fluxo de veículos no período da madrugada (00:00 até 05:00h), sendo este valor um dado suposto.

5.4 Conclusão

Como podemos verificar, foi descrito neste capítulo três modelos de interseções, cada qual variando suas características. Os dois primeiros sistemas demonstrados foram determinados empiricamente baseado em curvas de trânsito apresentadas nas bibliografias utilizadas como a referência [15]. O sistema 3 é um caso real verificado na referência [16], que contempla

uma interseção de três semáforos que já possuem um sistema de controle de trânsito pré-fixado.

Baseado nestes dados foram então desenvolvidos os controles *fuzzy* para cada sistema. Os resultados podem ser melhor observados no capítulo 6, aonde irá se verificar como se comporta o PCFT quando submetido a diversas situações.

É importante salientar que o PCFT possui uma interface gráfica e linhas de código desenvolvidas no software *Matlab®*. Assim, o usuário pode escolher o sistema que quer verificar, fazendo simulações, lançando os dados de entrada, como fluxo de veículos nas avenidas ou hora e minuto de um determinado período do dia, que simultaneamente o protótipo colocará na tela o ciclo completo de cada semáforo (ver anexo 4).

Concluindo, este capítulo serviu não somente para o conhecimento dos sistemas, mas também para se compreender como o Protótipo de Controle *Fuzzy* de Trânsito foi construído.

Capítulo 6: SIMULAÇÃO DO PCFT

6.1 Introdução

No capítulo 5 descrevemos o Protótipo de Controle *Fuzzy* de Trânsito (PCFT), onde demonstramos sua aplicação a três modelos de interseções viárias (sistema 1, sistema 2 e sistema 3). Neste capítulo faremos os testes para a validação do PCFT, executando simulações e avaliando seus resultados de modo a verificar a eficiência da lógica *fuzzy* como base para métodos de controle de trânsito urbano.

Os testes do protótipo foram baseados na inserção de valores de entrada no sistema (número de veículos nos sensores ou hora e minuto de período do dia) e conferir qual o tempo de verde e de ciclo total de cada semáforo.

6.2 Objetivos e Métodos Empregados na Simulação

Antes de avaliarmos os resultados obtidos pelo Protótipo de Controle *Fuzzy* de Trânsito (PCFT), é importante verificar quais os objetivos que pretendíamos alcançar. No capítulo 5, verificamos que os controles utilizando lógica *fuzzy* são razoavelmente simples de serem aplicados, proporcionando uma grande facilidade de executarmos controles de trânsito, tanto controlados pelo próprio tráfego, como também com tempo pré-fixado.

Porém, agora é necessário verificarmos como ficaram os resultados dos tempos de verde dos semáforos em relação às entradas *fuzzy* às quais o sistema foi submetido, podendo assim se fazer avaliações dos sistemas analisados. Também executamos, no caso do sistema 3, uma comparação entre os valores obtidos pelo PCFT e os valores pré-fixados existentes neste caso real.

Para isto teremos um rol de valores de entradas para os sistemas, conseguindo assim obtermos diversos valores de saída que poderão ser analisados, verificando-se os processos de *fuzzificação* e *defuzzificação* para estas análises. Posteriormente verificaremos a relação das entradas com as

respectivas saídas dos sistemas em forma de gráfico, mostrando a influência das funções de pertinência e das regras *fuzzy* para cada sistema.

6.3 Análise de Resultados

6.3.1 Análise do Sistema 1

O sistema 1 identificado na figura 5.1 (capítulo 5) foi submetido à análise do PCFT onde se pode verificar seus resultados de tempo de verde para os semáforos conforme entradas que este foi submetido. Para isto, foram realizados alguns testes de valores de entrada baseados no seu gráfico de fluxo (figura 5.2).

- **Análise com Sensor**

Na tabela 6.1 podemos verificar alguns valores que foram empregados nesta simulação. Os valores são baseados no gráfico de fluxo de veículos que foi dado no capítulo 5, sendo que aqui são apresentados sob a forma de veículos por hora e também veículos por minuto. Também são apresentados os valores de tempo de verde e ciclo total (somatório de todos os tempos de verde adicionado a 4,5 segundos por semáforo, referente ao sinal de amarelo) calculados pelo PCFT. Como o protótipo avalia o fluxo de veículo conforme este se comporta, adotamos que a entrada de valores corresponde ao mesmo valor de veículos por minuto.

Para podermos validar estes valores calculados, faremos um cálculo verificando o tempo de verde como se a interseção tivesse semáforos com tempos pré-fixados, utilizando o método desenvolvido por Webster [10] demonstrado no capítulo 3.

Na figura a seguir nos demonstra o fluxo de veículos (q) no pior caso encontrado nas avenidas do sistema 1 que é o das 18:00 horas e também o fluxo de saturação (s) que cada avenida possui.

Período do Dia	Avenida 1			Avenida 2			Avenida 3			Avenida 4			Ciclo (s) (k+a)
	q (V/h)	q (V/min)	k (s) PCFT	q (V/h)	q (V/min)	k (s) PCFT	q (V/h)	q (V/min)	k (s) PCFT	q (V/h)	q (V/min)	k (s) PCFT	
6:00h	280	5	13,2	90	2	5,8	180	3	11,0	120	2	5,8	53,8
8:00 h	1100	18	23,5	700	12	14,2	1000	17	22,6	640	11	13,9	92,3
10:00h	660	11	17,5	600	10	13,3	710	12	18,1	590	10	13,3	80,1
14:00h	710	12	18,1	620	10	13,3	650	11	17,5	600	10	13,3	80,1
16:00h	890	15	20,4	810	14	15,8	880	15	20,4	650	11	13,9	88,4
18:00h	1200	20	24,2	960	16	17,9	1100	18	23,4	890	15	17,2	100,8
21:00h	800	13	18,9	500	8	12,1	580	10	16,9	440	7	11,0	76,9
Pior Caso	-	25	32,1	-	20	23,7	-	25	32,1	-	20	23,7	129,7
Caso Especial	-	0	0,0	-	3	9,6	-	3	10,7	-	2	5,7	39,5

Tabela 6.1 – Verificação de Tempo de Verde para Semáforos do Sistema 1

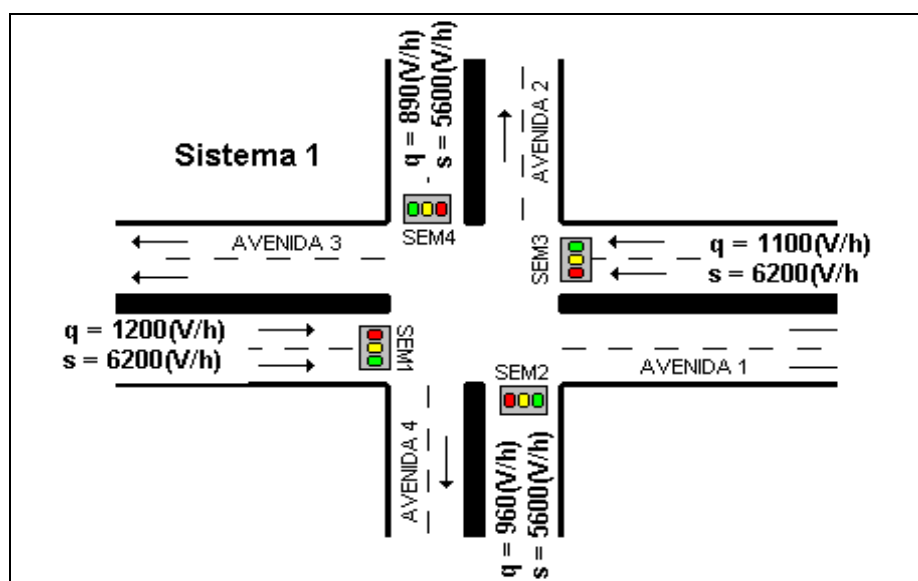


Fig. 6.1 – Análise de Fluxos q e s por Avenida do Sistema 1

Com isso, podemos então calcular o tempo de verde fixo para esta avenida e comparar com o valor que obtivemos pelo PCFT. Primeiro foi definido a taxa de ocupação da avenida:

$$y_1 = 1200/6200 = 0,194 \quad y_2 = 960/5600 = 0,171$$

$$y_3 = 1100/6200 = 0,177 \quad y_4 = 890/5600 = 0,159$$

Aplicando a equação 3-12 (capítulo 3), com tempo de vermelho de segurança sendo nulo, o tempo perdido por fase sendo fixado em 4 segundos e número de fases igual a quatro, temos então o tempo total perdido em um ciclo:

$$L = n \cdot (1 + R) = 4 \cdot (4 + 0)$$

$$L = 16$$

Com isso podemos aplicar a equação 3-15 que determina o comprimento de ciclo:

$$C = \frac{1,5 \cdot L + 5}{1 - \sum_{i=1}^n Y_i} = \frac{1,5 \times 16 + 5}{1 - (0,194 + 0,171 + 0,177 + 0,159)}$$

$$C = 97s$$

Determinado o tempo de ciclo podemos então verificar os valores proporcionais de verde para cada avenida, conforme a proporcionalidade (y_1 , y_2 , y_3 , y_4) adicionado a 4,5 segundos de fase amarela para cada semáforo:

$$k_{sem1} = 26,9 \text{ segundos}$$

$$k_{sem2} = 23,7 \text{ segundos}$$

$$k_{sem3} = 24,4 \text{ segundos}$$

$$k_{sem4} = 22,0 \text{ segundos}$$

Dentro deste contexto podemos verificar que o tempo de verde de k_{sem1} , subtraído do tempo de amarelo determinado, é 22,4 segundos, k_{sem2} é 19,2 segundos, k_{sem3} é 19,9 segundos e k_{sem4} ficaria com 17,5 segundos. Observamos que os tempos fixos calculados aqui são semelhantes aos apresentados pelo PCFT. O problema para este caso de tempo fixo é que seus tempos não irão variar em períodos onde o fluxo de veículos é baixo, ocorrendo então um atraso aos motoristas.

Também na tabela 6.1 podemos observar o tempo de verde para a máxima condição de atendimento do PCFT. Estes valores são os limites que o sistema *fuzzy* possui, ou seja, é o valor máximo que se admite por avenida, conforme descrição no capítulo 5. Quando estes números de veículos forem ultrapassados, o valor que o PCFT irá adotar será o valor máximo. Da mesma forma, quando obtivermos uma avenida que não tenha nenhum veículo para ser atendido, o semáforo terá seu tempo de verde nulo, sendo que ficará assim até se possuir veículos nesta.

Para melhor verificarmos o funcionamento do PCFT, os gráficos que demonstram a relação do número de veículos com o tempo de verde proporcional são caracterizados nas figura 6.2 e 6.3. Conforme descrito no capítulo 5, as regras *fuzzy* desenvolvidas para o PCFT são no sentido de

proporcionar um maior valor de tempo de verde para os semáforos à medida que o número de veículos aumenta nas avenidas.

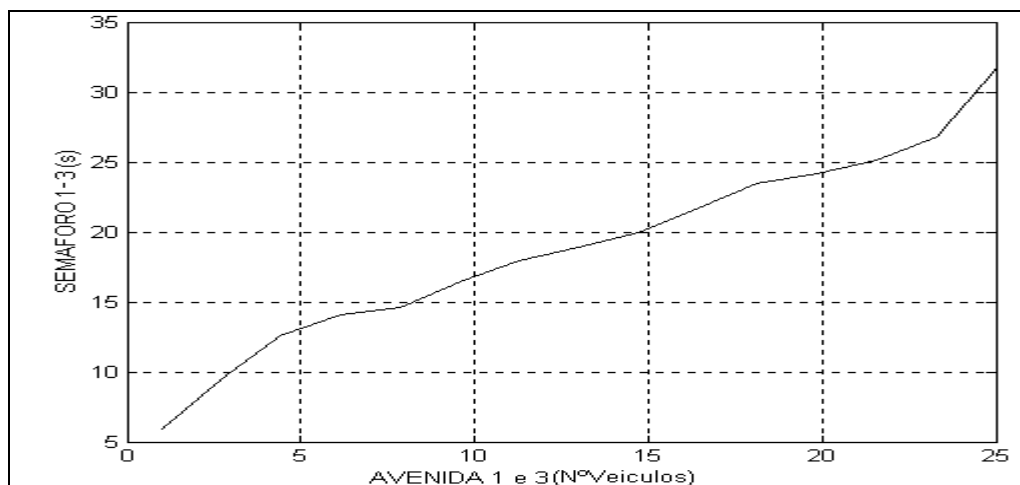


Fig.6.2 - Gráfico Demonstrativo de Tempo de Verde para as Avenidas 1 e 3 do Sistema 1

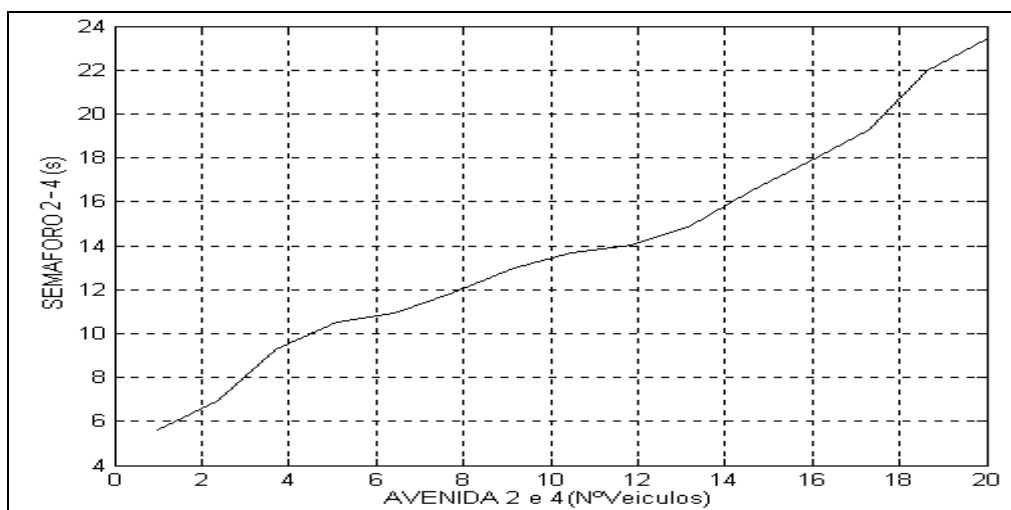


Fig. 6.3 - Gráfico Demonstrativo de Tempo de Verde para as Avenidas 2 e 4 do Sistema 1

- **Análise com Tempo Fixo**

Podemos verificar alguns valores que são empregados nesta simulação na tabela 6.2. Os valores são baseados no gráfico de fluxo de veículos que foi dado no capítulo 5, sendo que aqui são apresentados sob a forma de veículos por hora e também veículos por minuto, como realizado na simulação com sensor do sistema 1. Também é apresentado os valores de tempo de verde e ciclo total (somatório de todos os tempos de verde adicionado a 4,5 segundos por semáforo) calculados pelo PCFT. Como sabemos, nesta simulação o tempo de verde foi pré-fixado pelo PCFT, sendo que o único valor de entrada é

o período do dia descrito em horas, obedecendo a um estudo pré-estabelecido do fluxo das avenidas.

Período do Dia	Avenida 1			Avenida 2			Avenida 3			Avenida 4			Ciclo (s) (k+a)
	q (V/h)	q (V/min)	k (s) PCFT	q (V/h)	q (V/min)	k (s) PCFT	q (V/h)	q (V/min)	k (s) PCFT	q (V/h)	q (V/min)	k (s) PCFT	
6:00h	280	5	8,2	90	2	7,2	180	3	8,2	120	2	7,2	48,9
8:00 h	1100	18	23,3	700	12	17,2	1000	17	23,3	640	11	17,2	99,0
10:00h	660	11	16,4	600	10	12,9	710	12	16,4	590	10	12,9	76,7
14:00h	710	12	16,3	620	10	12,9	650	11	16,3	600	10	12,9	76,5
16:00h	890	15	24,7	810	14	18,7	880	15	24,7	650	11	18,7	104,9
18:00h	1200	20	32,1	960	16	24,0	1100	18	32,1	890	15	24,0	130,1
21:00h	800	13	22,0	500	8	16,8	580	10	22,0	440	7	16,8	95,6
23:00h	580	10	16,3	360	6	12,9	400	7	16,3	350	6	12,9	76,5
00:00h	450	8	16,3	320	5	12,9	380	6	16,3	280	5	12,9	76,5

Tabela 6.2 – Verificação de Tempo de Verde para Semáforos do Sistema 1 (Tempo Fixo)

Este sistema, com tempo pré-fixado foi desenvolvido para demonstrar a capacidade de se estabelecer também um controle de trânsito com tempo fixo utilizando lógica *fuzzy*. Este sistema é meramente ilustrativo e por isso não serão feitas comparações. Porém, é importante verificar que o gráfico de resposta às regras impostas pelo sistema caracteriza o fluxo de veículos durante um determinado dia da semana em função do tempo de verde que deverá ser adotado pelo semáforo. Se verificarmos o formato das linhas do gráfico de fluxo demonstrado no capítulo 5 (fig. 5.2) podemos ver que este possui semelhança com o apresentado nas figuras 6.4 e 6.5.

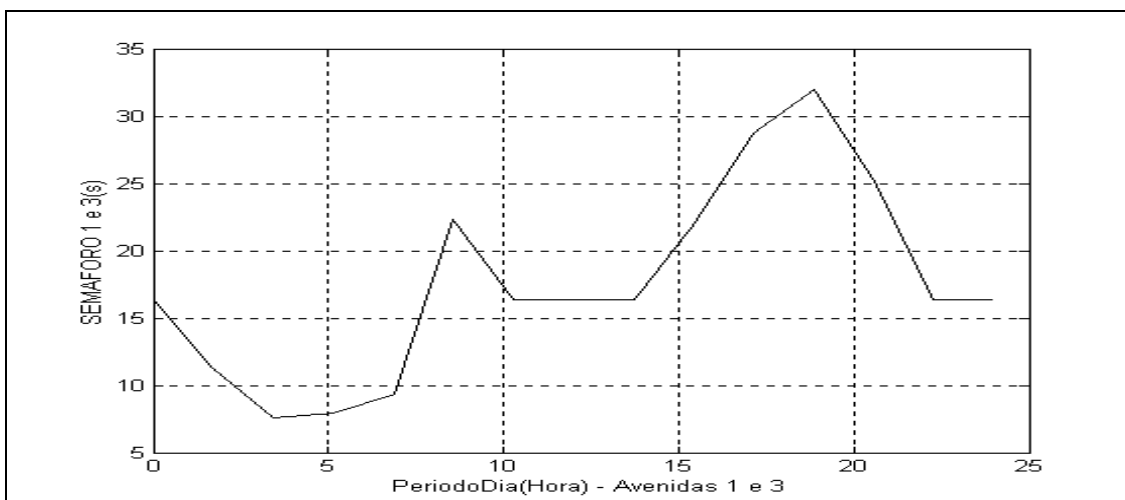


Fig. 6.4 - Gráfico Demonstrativo de Tempo de Verde para as Avenidas 1 e 3 do Sistema 1 com Tempo Fixo

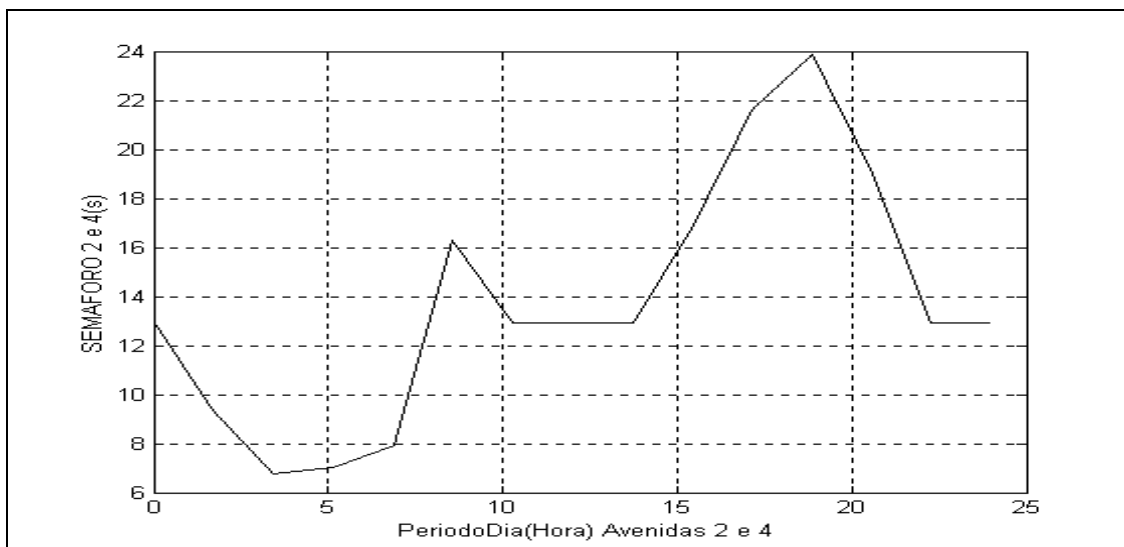


Fig. 6.5 - Gráfico Demonstrativo de Tempo de Verde para as Avenidas 2 e 4 do Sistema 1 com Tempo Fixo

6.3.2 Análise do Sistema 2

O sistema 2, que foi descrito no capítulo 5 e representado pela figura 5.5 foi submetido à análise do PCFT onde podemos verificar seus resultados de tempo verde para os semáforos conforme entrada que este foi submetido. Para isto, foram realizados alguns testes de valores de entrada baseado no seu gráfico de fluxo (figuras 5.7 e 5.8).

- **Análise com Sensor**

As tabelas 6.3 e 6.4 possuem o objetivo de demonstrar alguns valores empregados nesta simulação, sendo que estes foram baseados no gráfico de fluxo de veículos que foi dado no capítulo 5. Estes dados são apresentados sob a forma de veículos por hora e também veículos por minuto. Também são apresentados os valores de tempo de verde e ciclo total (somatório de todos os tempos de verde adicionado a 4,5 segundos por semáforo) calculados pelo PCFT.

Período do Dia	Avenida 1						Avenida 2					
	SEM. 1 q (V/h)	SEM. 1 q (V/min)	k1-5 (s) PCFT	SEM. 2 q (V/h)	SEM. 2 q (V/min)	k2-6 (s) PCFT	SEM. 5 q (V/h)	SEM. 5 q (V/min)	k1-5 (s) PCFT	SEM. 6 q (V/h)	SEM. 6 q (V/min)	k2-6 (s) PCFT
6:00h	150	3	7,2	410	7	14,9	175	3	7,2	500	8	14,9
8:00h	450	8	10,1	1300	22	22,8	445	7	10,1	1250	21	22,8
10:00h	270	5	8,5	790	13	19,3	300	5	8,5	840	14	19,3
14:00h	285	5	8,5	850	14	19,6	290	5	8,5	840	14	19,6
16:00h	360	6	9,6	1020	17	20,9	390	7	9,6	1100	18	20,9
18:00h	515	9	11,7	1450	24	25,6	630	11	11,7	1600	27	25,6
21:00h	330	6	9,1	940	16	20,4	340	6	9,1	980	16	20,4
Pior Caso	900	15	14,9	1920	32	32,8	900	15	14,9	1920	32	32,8
Especial	-	0	0	-	4	13,3	-	0	0	-	5	13,3

Tabela 6.3 – Verificação de Tempo de Verde para Semáforos do Sistema 2
(Com Sensor) para as Avenidas 1 e 2

Período do Dia	Avenida 3						Avenida 4					
	SEM. 7 q (V/h)	SEM. 7 q (V/min)	k3-7 (s) PCFT	SEM. 8 q (V/h)	SEM. 8 q (V/min)	k4-8 (s) PCFT	SEM. 3 q (V/h)	SEM. 3 q (V/min)	k3-7 (s) PCFT	SEM. 4 q (V/h)	SEM. 4 q (V/min)	k4-8 (s) PCFT
6:00h	60	1	5,5	180	3	10,1	40	1	5,5	130	2	10,1
8:00h	310	5	9,1	1000	17	20,3	270	5	9,1	880	15	20,3
10:00h	215	4	8,5	710	12	16,4	180	3	8,5	590	10	16,4
14:00h	200	3	8,0	650	11	16,2	165	3	8,0	550	9	16,2
16:00h	270	5	9,1	880	15	18,3	220	4	9,1	720	12	18,3
18:00h	335	6	9,3	1100	18	20,5	295	5	9,3	950	16	20,5
21:00h	180	3	8,0	580	10	15,5	150	3	8,0	490	8	15,5
Pior Caso	600	10	14,0	1500	25	27,8	600	10	14,0	1500	25	27,8
Especial	-	0	7,9	-	5	12,3	-	3	7,9	-	2	12,3

Tabela 6.4 – Verificação de Tempo de Verde para Semáforos do Sistema 2
(Com Sensor) para as Avenidas 3 e 4

Na tabela 6.5, é colocado o tempo de ciclo por fase dimensionado pelo PCFT. Este tempo de ciclo (C), conforme já descrito no capítulo 5, é o somatório dos quatro tempos calculados para verde adicionado de 4,5 segundo de tempo de amarelo (a) por fase.

Período do Dia	Σ Tempo de verde	Ciclo (C)
6:00h	37,7 s	55,7 s
8:00h	62,3 s	80,3 s
10:00h	52,8 s	70,8 s
14:00h	52,3 s	70,3 s
16:00h	57,9 s	75,9 s
18:00h	67,1 s	85,1 s
21:00h	53,0 s	71,0 s
Pior Caso	89,4 s	107,4 s
Especial	29 s	47,0 s

Tabela 6.5 – Somatório do Tempo de Verde e Ciclo Total para os Valores Analisados no Sistema 2

Executando uma análise sobre estes valores, podemos então observar que este sistema 2 possui ciclos menores que o do sistema 1, mesmo possuindo fluxos de veículos maiores. Isto se deve ao fato de que a composição física da interseção deste sistema propicia maior agilidade para escoar o fluxo que está ocorrendo em determinado momento nas avenidas.

Para a pior condição dos sensores colocados nas avenidas o ciclo maior durou 107,4 segundos, atingindo assim também um dos objetivos do PCFT, que é o de não possuir ciclos maiores que 130 segundos. Outro fato que se deve observar é que o PCFT para o sistema 2 analisa qual é o maior fluxo entre as avenidas concorrentes (1-5, 2-6, 3-7 e 4-8), adotando como entrada para o sistema *fuzzy* o valor que representa o pior caso. Isto pode ser melhor analisado nas tabelas 6.4 e 6.5, onde, por exemplo, no caso “especial”, o sensor do semáforo 7 não possui veículo nenhum trafegando e o sensor do semáforo 3 possui três veículos. O valor de entrada para o sistema *fuzzy* será o do semáforo 3, que resultou então em um tempo de verde de 7,9 segundos. Apesar de liberar a interseção para este semáforo nulo, não se pode avaliar como uma perda dentro do sistema, pois acima de tudo, a interseção funciona com a concorrência entre semáforos.

Para melhor verificarmos o funcionamento do PCFT, os gráficos que demonstram a relação do número de veículos com o tempo de verde proporcional são demonstrados nas figuras 6.6, 6.7, 6.8 e 6.9. Conforme descrito no capítulo 5, as regras *fuzzy* desenvolvidas para o PCFT objetivam proporcionar um maior valor de tempo de verde para os semáforos à medida que o número de veículos aumenta nas avenidas.

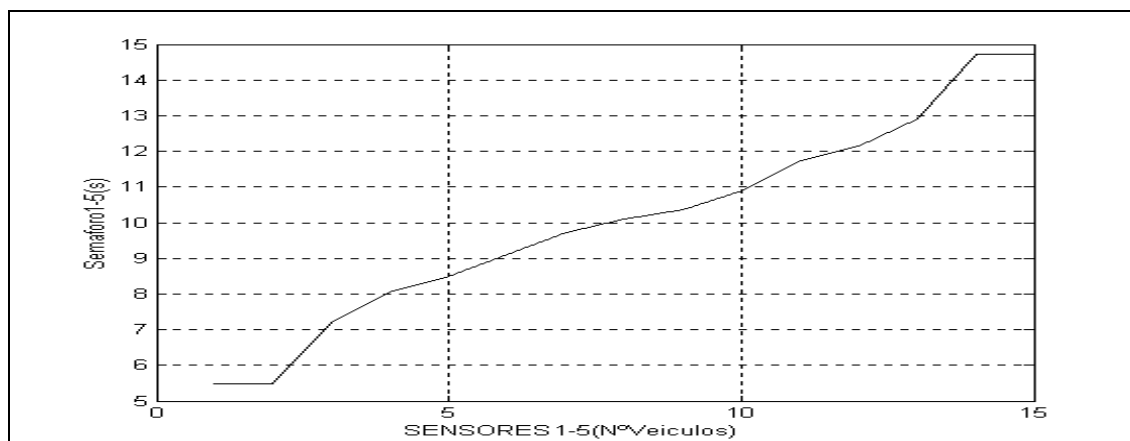


Fig.6.6 - Gráfico Demonstrativo do Tempo de Verde para os Sensores 1-5 do Sistema 2

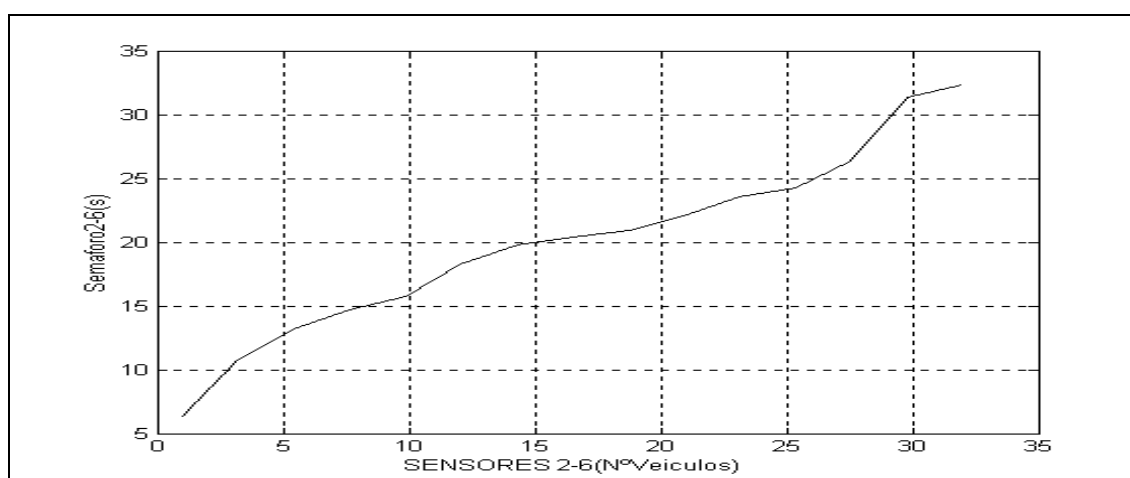


Fig. 6.7 - Gráfico Demonstrativo do Tempo de Verde para os Sensores 2-6 do Sistema 2

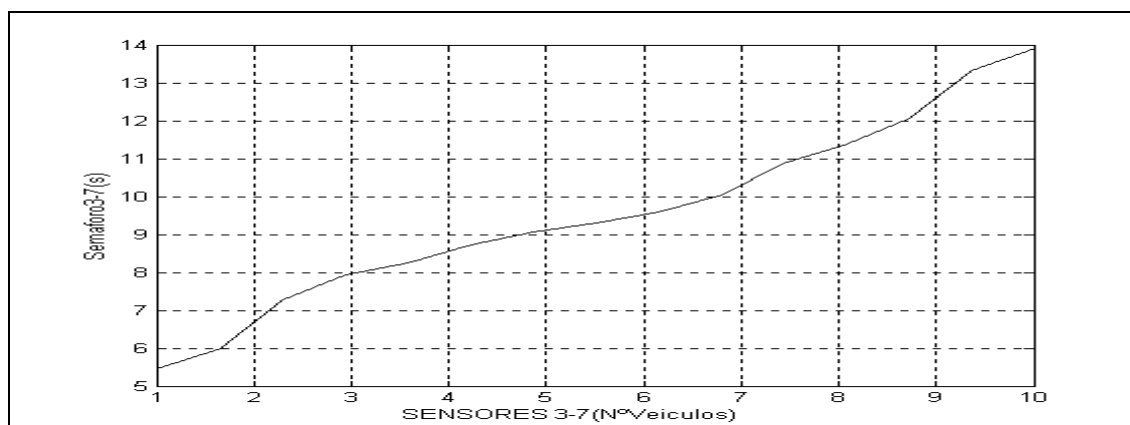


Fig.6.8 - Gráfico Demonstrativo do Tempo de Verde para os Sensores 3-7 do Sistema 2

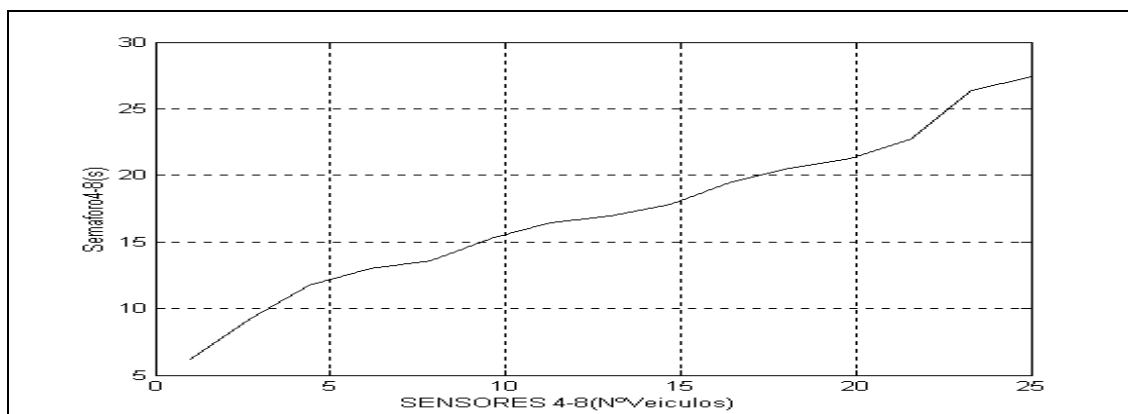


Fig. 6.9 - Gráfico Demonstrativo do Tempo de Verde para os Sensores 3-7 do Sistema 2

• Análise com Tempo Fixo

Os valores que foram empregados nas tabelas 6.6 e 6.7 para este sistema 2 com tempo fixo são baseados no gráfico de fluxo de veículos que foi dado no capítulo 5, sendo que aqui são apresentados sob a forma de veículos por hora e também veículos por minuto. Também são apresentados os valores de tempo de verde e ciclo total (somatório de todos os tempos de verde adicionado a 4,5 segundos por semáforo) calculados pelo PCFT (tabela 6.8), assim como nos outros sistemas. Como sabemos, assim como no sistema 1, nesta simulação o tempo de verde foi pré-fixado pelo PCFT, sendo que o único valor de entrada é o período do dia descrito em horas, obedecendo a um estudo pré-estabelecido do fluxo das avenidas. Verificando o formato das linhas do gráfico de fluxo demonstrado no capítulo 5 (fig. 5.7 e Fig. 5.8) podemos observar que este possui semelhança com o apresentado nas figura 6.9, 6.10, 6.11 e 6.12.

Período do Dia	Avenida 1						Avenida 2					
	SEM. 1 q (V/h)	SEM. 1 q (V/min)	k1-5 (s) PCFT	SEM. 2 q (V/h)	SEM. 2 q (V/min)	k2-6 (s) PCFT	SEM. 5 q (V/h)	SEM. 5 q (V/min)	k1-5 (s) PCFT	SEM. 6 q (V/h)	SEM. 6 q (V/min)	k2-6 (s) PCFT
6:00h	150	3	6,21	410	7	9,0	175	3	6,21	500	8	9,0
8:00h	450	8	11,7	1300	22	26,6	445	7	11,7	1250	21	26,6
10:00h	270	5	8,8	790	13	17,3	300	5	8,8	840	14	17,3
14:00h	285	5	8,8	850	14	17,4	290	5	8,8	840	14	17,4
16:00h	360	6	11,6	1020	17	26,0	390	7	11,6	1100	18	26,0
18:00h	515	9	14,9	1450	24	37,1	630	11	14,9	1600	27	37,1
21:00h	330	6	10,6	940	16	22,8	340	6	10,6	980	16	22,8
00:00h	195	3	8,8	580	10	17,4	180	3	8,8	500	8	17,4

Tabela 6.6 – Verificação de Tempo de Verde para Semáforos do Sistema 2 (Tempo Fixo) para as Avenidas 1 e 2

Período do Dia	Avenida 3						Avenida 4					
	SEM. 7 q (V/h)	SEM. 7 q (V/min)	k3-7 (s) PCFT	SEM. 8 q (V/h)	SEM. 8 q (V/min)	k4-8 (s) PCFT	SEM. 3 q (V/h)	SEM. 3 q (V/min)	k3-7 (s) PCFT	SEM. 4 q (V/h)	SEM. 4 q (V/min)	k4-8 (s) PCFT
6:00h	60	1	8,0	180	3	8,2	40	1	8,0	130	2	8,2
8:00h	310	5	10,5	1000	17	20,9	270	5	10,5	880	15	20,9
10:00h	215	4	8,2	710	12	14,4	180	3	8,2	590	10	14,4
14:00h	200	3	8,2	650	11	14,4	165	3	8,2	550	9	14,4
16:00h	270	5	10,6	880	15	21,3	220	4	10,6	720	12	21,3
18:00h	335	6	13,1	1100	18	29,4	295	5	13,1	950	16	29,4
21:00h	180	3	9,7	580	10	18,8	150	3	9,7	490	8	18,8
00:00h	100	2	8,2	320	5	14,4	85	1	8,2	280	5	14,4

Tabela 6.7 – Verificação de Tempo de Verde para Semáforos do Sistema 2 (Tempo Fixo) para as Avenidas 3 e 4

Período do Dia	Σ Tempo de verde	Ciclo (C)
6:00h	29,5 s	47,5 s
8:00h	69,6 s	87,6 s
10:00h	48,7 s	66,7 s
14:00h	48,9 s	66,9 s
16:00h	69,5 s	87,5 s
18:00h	94,5 s	112,5 s
21:00h	61,9 s	79,9 s
00:00h	49,0 s	67,0 s

Tabela 6.8 – Somatório do Tempo de Verde e Ciclo Total para os Valores Analisados no Sistema 2 com Tempo Fixo

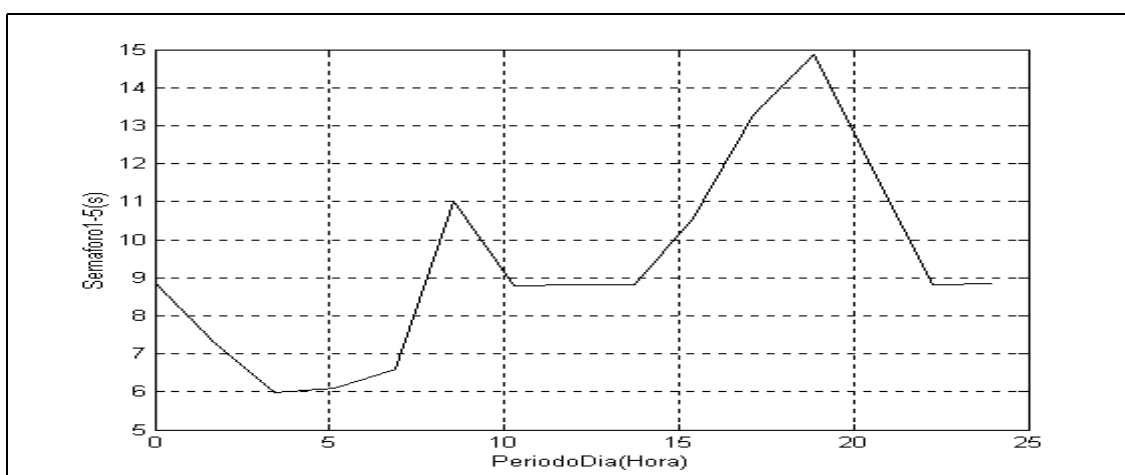


Fig. 6.10 - Gráfico Demonstrativo do Tempo de Verde para os Sensores 1-5 do Sistema 2 com Tempo Fixo

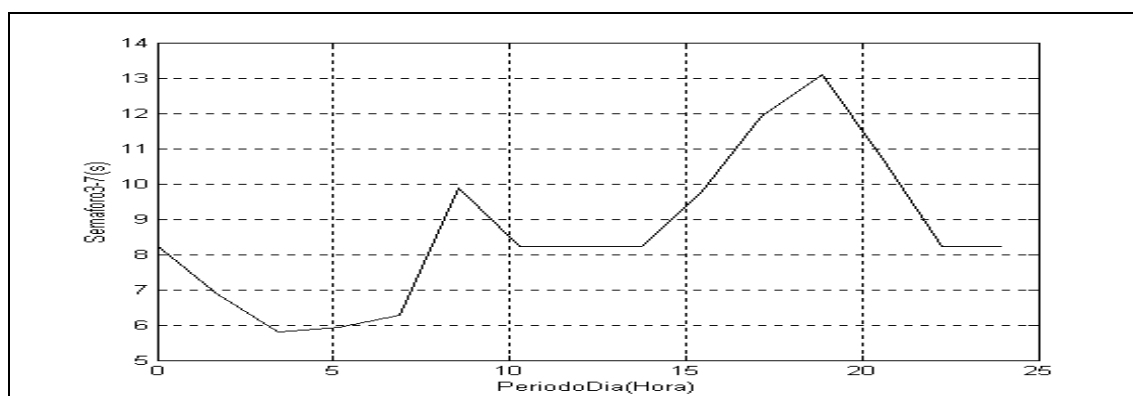


Fig. 6.11 - Gráfico Demonstrativo do Tempo de Verde para os Sensores 3-7 do Sistema 2 com Tempo Fixo

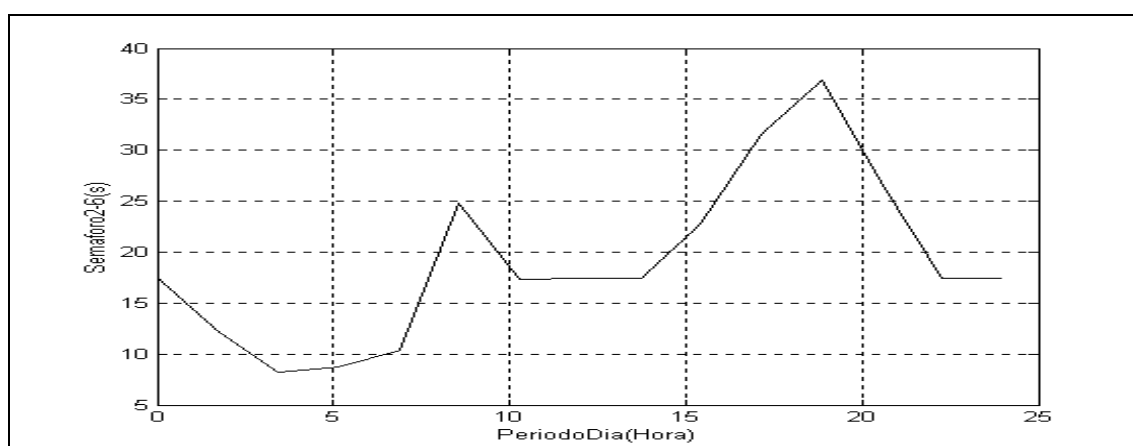


Fig. 6.12 - Gráfico Demonstrativo do Tempo de Verde para os Sensores 2-6 do Sistema 2 com Tempo Fixo

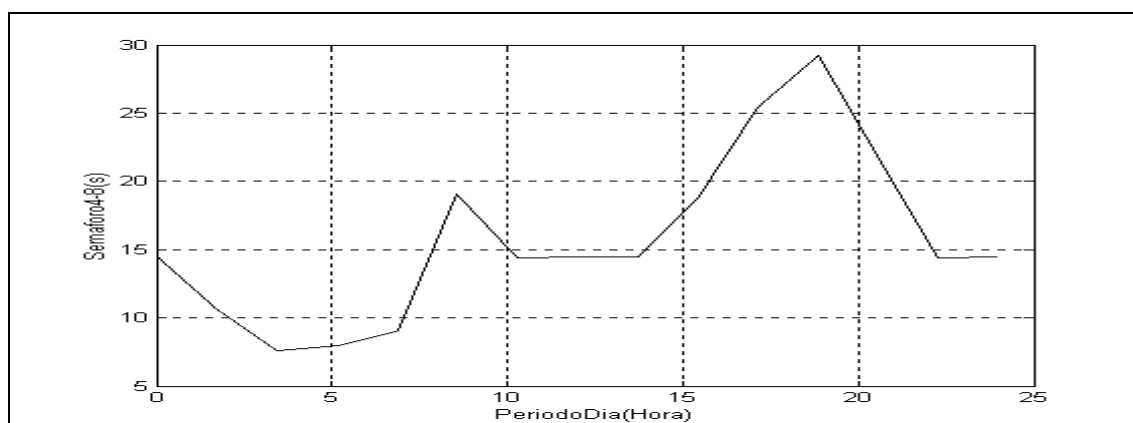


Fig. 6.13 - Gráfico Demonstrativo do Tempo de Verde para os Sensores 4-8 do Sistema 2 com Tempo Fixo

6.3.3 Análise do Sistema 3

Conforme descrito no capítulo 5, o sistema 3 é baseado em uma interseção real, retirada da bibliografia [16], onde já estão calculados os tempos de verde pré-fixados para este semáforo. Trata-se de uma interseção entre as avenidas Waldemar Paschoal (WP) e Monsenhor João Ladeira (JL) que possuem semáforos que são acionados simultaneamente, sendo as avenidas com maior fluxo de veículos, e também a avenida Mal. Carmona (MC) em São Paulo. Para este caso também foi realizado simulações com sensor e com um tempo *fuzzy* pré-fixado pelo PCFT.

- **Análise com Sensor**

As tabelas 5.1, 5.2 no capítulo 5 e a tabela A.3 no anexo, mostram o tempo de ciclo total e de verde para cada fase do ciclo dos semáforos, demonstrando que para cada período do dia existe uma alteração neste tempo de ciclo. Estas variações de período do dia foram a base para montar a tabela 6.9, que é apresentada com valores estabelecidos pelo semáforo e os valores calculados pelo PCFT.

Período	Av. Waldemar Paschoal				Av. Mons. João M. Ladeira				Av. Mal. Carmona			
	q (V/h)	q (v/min)	Verde Sistema	Verde PCFT	q (V/h)	q (v/min)	Verde Sistema	Verde PCFT	q (V/h)	q (v/min)	Verde Sistema	Verde PCFT
05:00 - 06:30 h	1170	20	33	33,3	953	16	33	33,3	713	12	17	19,8
06:30 - 09:00 h	2769	46	53	59,5	2100	35	53	59,5	976	16	22	22,5
09:00 - 11:00 h	2237	37	33	47,0	1619	27	33	47,0	812	14	17	21,0
11:00 - 14:30 h	2529	42	40	47,5	1486	25	40	47,5	947	16	20	22,5
14:30 - 16:00 h	1986	33	33	38,2	1252	21	33	38,2	800	13	22	20,4
16:00 - 16:45 h	3435	57	56	62,0	2215	37	56	62,0	1051	18	24	24,8
16:45 - 19:30 h	3435	57	70	62,0	2215	37	70	62,0	1051	18	25	24,8
19:30 - 20:00 h	3435	57	51	62,0	2215	37	51	62,0	1051	18	29	24,8
20:00 - 21:00 h	1370	23	33	38,2	1262	21	33	38,2	463	8	17	15,0
21:00 - 00:00 h	1170	20	30	33,3	953	16	30	33,3	713	12	15	19,8

Tabela 6.9 – Verificação de Tempo de Verde para Semáforos do Sistema 3 (com Sensor)

Período	Ciclo Sistema	Ciclo do PCFT
05:00 - 06:30 h	60 s	62,1 s
06:30 - 09:00 h	85 s	91,0 s
09:00 - 11:00 h	60 s	77,0 s
11:00 - 14:30 h	70 s	79,0 s
14:30 - 16:00 h	65 s	67,6 s
16:00 - 16:45 h	90 s	95,8 s
16:45 - 19:30 h	105 s	95,8 s
19:30 - 20:00 h	90 s	95,8 s
20:00 - 21:00 h	60 s	62,2 s
21:00 - 00:00 h	55 s	62,1 s

Tabela 6.10 – Somatório do Tempo de Ciclo Total para os Valores Analisados no Sistema 3 com Sensor

Em uma comparação com os valores que existem nos semáforos da interseção e os calculados pelo PCFT, podemos verificar que os valores do protótipo conseguiram satisfazer os tempos de verdes necessários para cada período do dia. É bom lembrar que os valores de fluxo que foram fornecidos são valores que correspondem à média de veículos por hora para cada avenida. Para obtermos uma boa simulação seria preciso possuir dados mais exatos sobre estes fluxos. No gráfico da figura 6.12, onde os valores tanto para o sistema existente quanto ao calculado pelo PCFT quase se equivalem, demonstrando então que o sistema poderia tranquilamente ser controlado por controle *fuzzy*.

Na tabela 6.10, temos um outro comparativo que demonstra os tempos de ciclo em segundos para cada período do dia. Devemos lembrar que o tempo de ciclo total para o PCFT é o somatório de tempo de verde para os semáforos adicionado de 4,5 segundo de tempo de amarelo por fase (ou seja, para o sistema 3, nove segundos). Em uma comparação podemos ver que os valores se equivalem, estando próximos um do outro, sendo que o valor do PCFT possui a vantagem, conforme já comentado, de variar conforme a demanda de fluxo de veículos, o que é uma grande vantagem em relação ao sistema empregado nesta interseção.

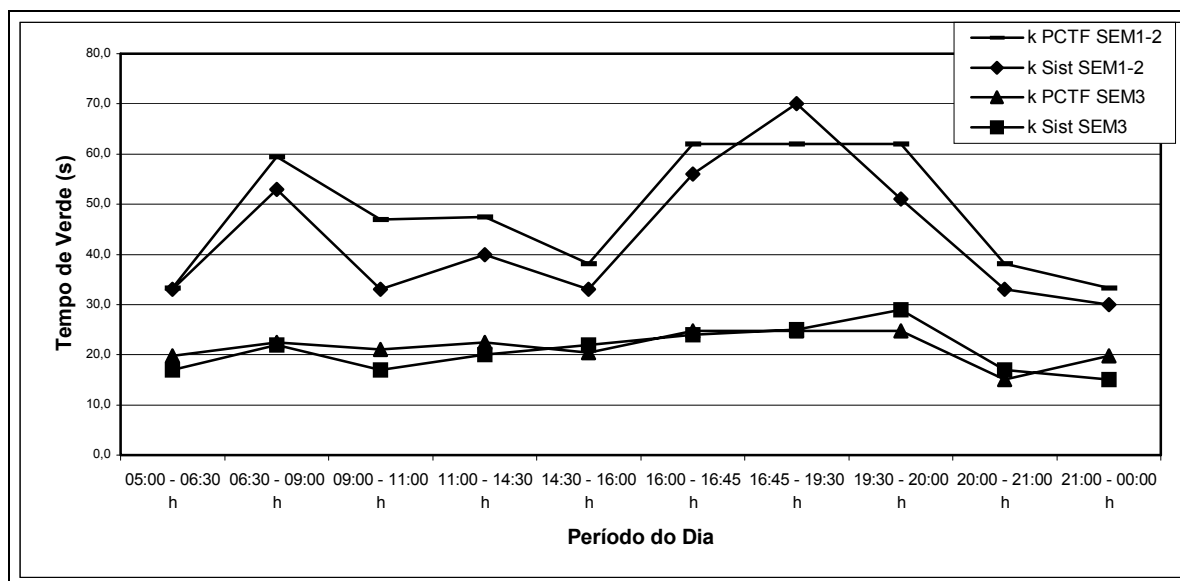


Fig. 6.14 – Gráfico Comparativo dos Tempos de Verde Entre o Sistema Existente e o Calculado pelo PCFT para o Sistema 3

A diferença entre um sistema *fuzzy* de controle de trânsito e o que está sendo empregado na interseção referente ao sistema 3 é que o tempo de verde não ficaria fixo para determinados períodos, mas sim variando conforme a demanda de fluxo nas avenidas. Isto traria uma grande diminuição do tempo perdido nestas por não estabelecer um tempo de verde maior que o necessário para o escoamento dos veículos, diminuindo assim o atraso médio gerado pelo sistema. Um exemplo é a queda brusca do tempo de verde que o sistema atual executa no horário 19:59h para as 20:00h, onde os semáforos SEM1-2 e SEM3 possuem tempos de verde de 51 e 29 segundos respectivamente, passando para 33 e 17 segundos. Ou seja, existe uma queda grande de ciclo, sendo que um sistema *fuzzy* faria isto gradativamente com a diminuição do fluxo de veículos nas avenidas.

As figuras 6.15 e 6.16 demonstram a resposta de tempo de verde para os semáforos do sistema 3 em função da variação de fluxo de veículos. Podemos notar que o segundo gráfico (fig. 6.16) é tridimensional, pois as demandas de fluxo das avenidas Waldemar Paschoal (WP) e Monsenhor João Ladeira (JL) possuem semáforos que são acionados simultaneamente, precisando existir um comparativo entre elas para possuir um tempo de verde único. As regras estabelecidas para o sistema *fuzzy* conseguem fornecer um tempo único levando em conta a demanda de fluxo de ambas. A avenida Mal.

Carmona (MC) possui seu gráfico isolado, já que a sua entrada crisp é a própria demanda de fluxo de veículos existente.

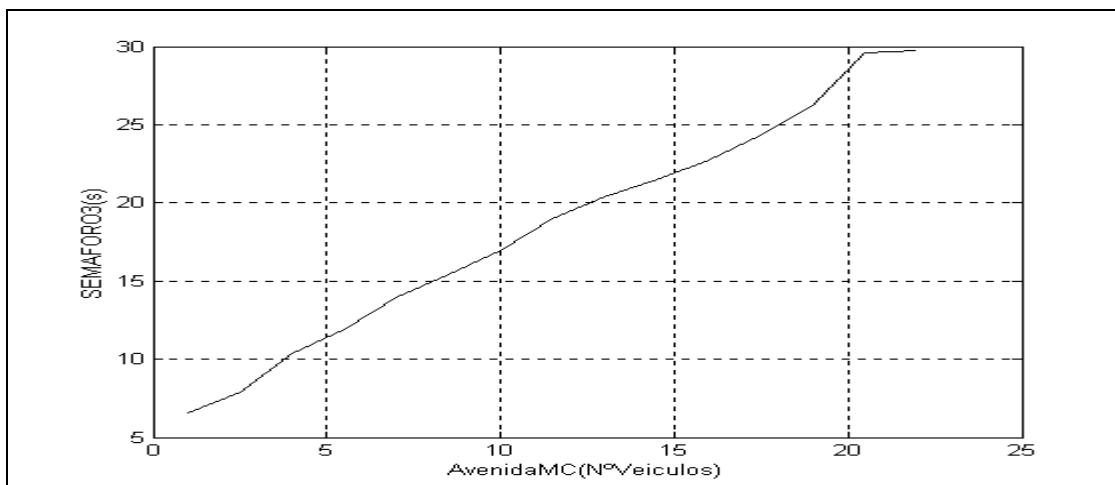


Fig. 15 - Gráfico Demonstrativo do Tempo de Verde para o Semáforos 3 do Sistema 3 com Sensor

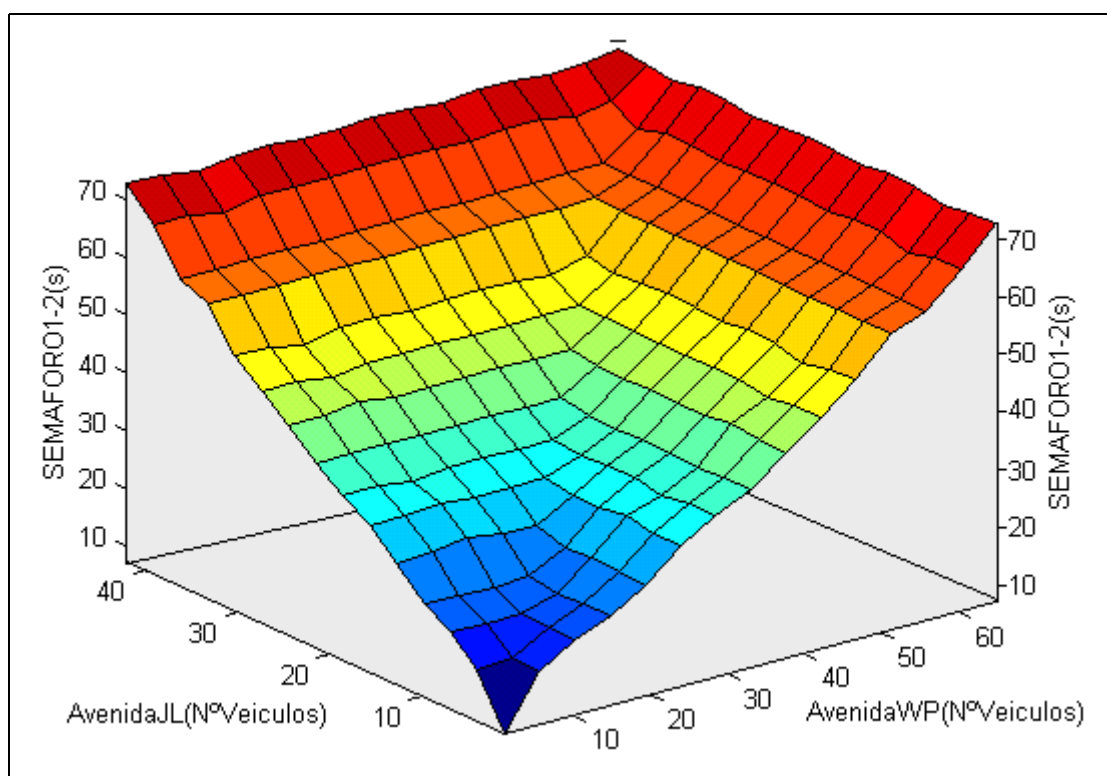


Fig. 6.16 - Gráfico Demonstrativo do Tempo de Verde para os Semáforos 1-2 do Sistema 3 com Sensor

- **Análise com Tempo Fixo**

Assim como nos outros sistemas, aqui foi realizada uma simulação adotando um tempo fixo *fuzzy*, que varia conforme o período do dia. Este sistema pode ser melhor comparado ao sistema empregado nesta interseção,

pois este também se trata de um sistema com tempo fixo que varia durante o período do dia. O que o PCFT quer executar aqui é um amortecimento nas mudanças de tempo de semáforo de um período para o outro do dia.

Na tabela 6.11, podemos verificar alguns valores que são empregados nesta simulação. Os valores são baseados no gráfico de fluxo de veículos que foi dado no capítulo 5 para o sistema 3, sendo que aqui são apresentados sob a forma de veículos por hora e também veículos por minuto calculados pelo PCFT.

Observamos que existe uma boa semelhança entre os valores já estabelecidos na interseção e os apresentados pelo PCFT demonstrados na tabela 6.11. O protótipo traz uma vantagem, que é de não haver mudança brusca de tempo de ciclo de um período para outro. Pelos gráficos das figuras 6.17 e 6.18, podemos então verificar melhor este fato. O formato das linhas do gráfico, assim como nos sistemas 1 e 2, tentam expressar o formato do gráfico de demanda de fluxo durante 24 horas. Isto faz com que os condutores de veículos não percam tanto tempo nesta interseção, sendo que o bom dimensionamento deste sistema resulta em uma boa eficácia de uma interseção controlada por semáforos.

Período	Av. Waldemar Paschoal				Av. Mons. João M. Ladeira				Av. Mal. Carmona			
	q (V/h)	q (v/min)	Verde Sistema	Verde PCFT	q (V/h)	q (v/min)	Verde Sistema	Verde PCFT	q (V/h)	q (v/min)	Verde Sistema	Verde PCFT
5:00h	1170	20	33	17,9	953	16	33	17,9	713	12	17	10,9
6:00h	1170	20	33	18,7	953	16	33	18,7	713	12	17	11,2
6:30h	2769	46	53	19,2	2100	35	53	19,2	976	16	22	11,4
9:00h	2237	37	33	36,0	1619	27	33	36,0	812	14	17	19,3
11:00h	2529	42	40	35,8	1486	25	40	35,8	947	16	20	19,3
14:30h	1986	33	33	35,8	1252	21	33	35,8	800	13	22	19,3
16:00h	3435	57	56	55,2	2215	37	56	55,2	1051	18	24	23,3
16:45h	3435	57	70	61,0	2215	37	70	61,0	1051	18	25	25,3
19:30h	3435	57	51	69,2	2215	37	51	69,2	1051	18	29	29,8
20:00h	1370	23	33	63,0	1262	21	33	63,0	463	8	17	26,3
21:00h	1170	20	30	49,1	953	16	30	49,1	713	12	15	21,7
00:00h	1170	20	30	35,7	953	16	30	35,7	713	12	15	19,3

Tabela 6.11 - Verificação de Tempo de Verde para Semáforos do Sistema 3 (com Tempo Fixo)

Período	Ciclo Sistema	Ciclo PCFT
5:00h	60 s	37,8 s
6:00h	60 s	38,9 s
6:30h	85 s	39,6 s
9:00h	60 s	64,3 s
11:00h	70 s	64,1 s
14:30h	65 s	64,1 s
16:00h	90 s	87,5 s
16:45h	105 s	95,3 s
19:30h	90 s	108,0 s
20:00h	60 s	98,3 s
21:00h	55 s	79,8 s
00:00h	55 s	64,0 s

Tabela 6.12 – Somatório do Tempo de Ciclo Total para os Valores Analisados no Sistema 3 com Tempo Fixo

A aplicação do PCFT para o sistema 3 foi realizada com a finalidade de termos um parâmetro de comparação para aferir o desempenho do protótipo. Porém, é importante lembrar que para executar um modelo na prática, é preciso um estudo mais completo sobre o tráfego desta interseção. Não é adequado simplesmente nos basearmos em dados escassos para definir os tempos de ciclo, pois é preciso dispor do maior número possível de informações a fim de efetuarmos um controle de máxima eficiência, diminuindo o atraso dos veículos.

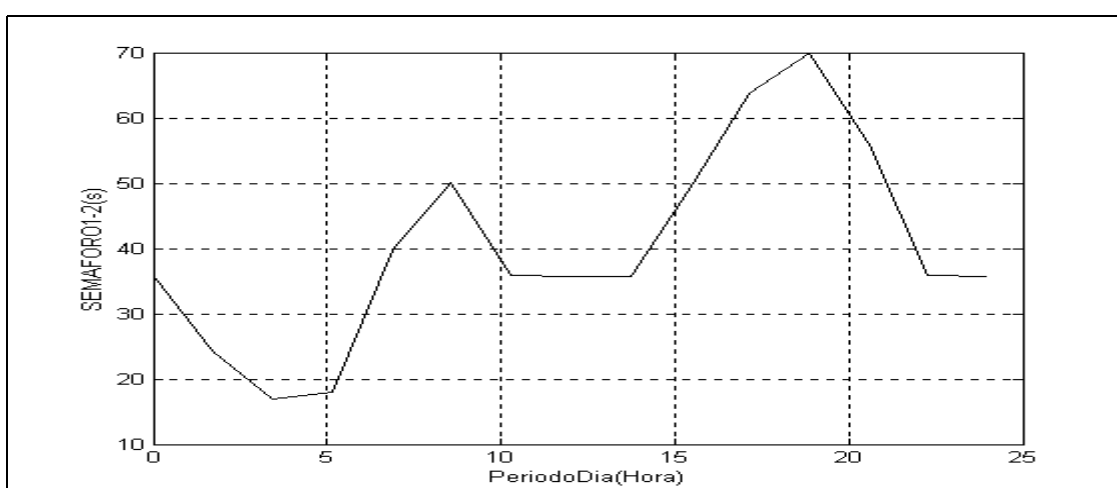


Fig. 6.17 - Gráfico Demonstrativo das Regras para os Semáforos 1-2 do Sistema 3 com Sensor

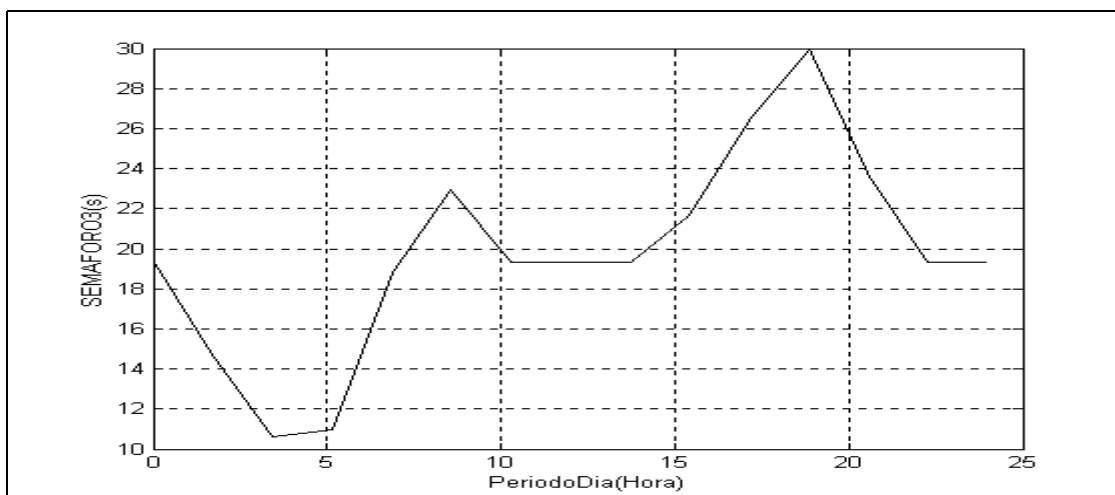


Fig. 6.18 - Gráfico Demonstrativo das Regras para os Semáforos 1-2 do Sistema 3 com Sensor

6.4 Conclusão

Após a simulação das três interseções analisadas, podemos então verificar que é possível e vantajoso executar um sistema de controle de trânsito utilizando lógica *fuzzy*.

No sistema 1 foi verificado o funcionamento do sistema como se este fosse um controle com um tempo fixo único e conseguiu-se observar que os tempos de ciclo e tempos de verde, para uma situação máxima, estavam de acordo com o tempo para a mesma situação com o PCFT. A grande vantagem do controle de trânsito com lógica *fuzzy* é que o sistema pode ser realimentado pelos sensores e assim, pode variar conforme a demanda de fluxo de veículos no decorrer de um dia.

No sistema 2, ocorreu que o dimensionamento físico da interseção permitiu com que os tempos de ciclo fossem menores que os do sistema 1, proporcionando assim menos atraso aos condutores de veículos. É importante salientar que as interseções com semáforos não devem possuir tempos de ciclos muito grandes, pois isto provocaria um grande atraso. Ciclos menores fazem com que as filas nas avenidas estejam sempre em movimento.

O sistema 3 pode ser considerado o mais interessante, pois é nele que podemos comparar os valores dimensionados pelo PCFT a um caso real que foi previamente calculado para possuir temporização fixa. Os valores obtidos e

demonstrados satisfizeram a simulação, sendo que mostrou que o PCFT pode ser passado a uma nova etapa, que é a de aplicação prática.

Outra vantagem pode ser citada, é o fato da grande facilidade de alteração dos valores das funções de pertinência do sistema de controle. Se observado em um caso prático que os tempos de ciclo não são satisfatórios, a alteração dos valores dos conjuntos *fuzzy* são de simples execução.

Um controle de trânsito utilizando lógica *fuzzy*, vistos os resultados, pode constituir-se em uma alternativa vantajosa, principalmente por sua simplicidade de projeto e eficiência operacional. Com um sistema *fuzzy*, os modelos tornam-se mais simples e intuitivos, e as mudanças de parâmetros também se tornam fáceis. Com isso, podemos supor que o PCFT poderá vir a ser aperfeiçoado em pesquisas subseqüentes e colocado em um sistema real, controlando tanto uma interseção isolada quanto uma malha viária mais complexa.

Capítulo 7: CONCLUSÕES

7.1 Introdução

O uso de protótipos como instrumentos auxiliares de projeto há muito tempo tem sido de grande importância. Um bom protótipo pode proporcionar um meio eficiente para testes e simulações, sendo que a fase de planejamento e projeto de um determinado sistema proporciona, se bem realizada, pode resultar em uma grande redução de custos e, por isso, as análises dentro de uma situação real são muito importantes. Nessas circunstâncias, a criação de protótipos para a verificação de um novo projeto é muito importante para o desenvolvimento final deste, sendo que, se possuímos o conhecimento necessário, além de uma boa metodologia, este pode ter baixos níveis de erro.

No que se refere a sistemas de controle de tráfego, em particular em interseções de vias, podemos dizer que um bom planejamento do seu traçado geométrico é um aspecto essencial para sua eficiência, e somente a seguir vêm os estudos sobre os métodos para otimizar seu funcionamento. Os protótipos servem para auxiliar em simulações objetivando prever situações que podem vir ocorrer nesta interseção.

Este trabalho apresenta um modelo de controle de trânsito utilizando lógica *fuzzy*. Para isto criamos um protótipo de modelo com o emprego do *software* Matlab®, tendo o propósito de contribuir para o aprimoramento da metodologia de planejamento e projeto de controladores de tráfego. Com isto, conseguimos identificar e observar como se comporta um sistema *fuzzy* aplicados em controle de tráfego urbano.

No decorrer deste capítulo de conclusão poderemos então verificar os principais pontos que devemos destacar desta dissertação e dos futuros trabalhos que poderão vir a ser desenvolvidos.

7.2 Sumário da Dissertação

Esta dissertação sobre controle de trânsito urbano *fuzzy* contemplou várias etapas desde o seu projeto inicial, passando pelas seguintes fases:

- Revisão Bibliográfica: nesta etapa dedicamo-nos à pesquisa e à leitura de textos pertinentes ao assunto, incluindo livros e artigos sobre lógica *fuzzy*, Inteligência Artificial e controle de trânsito urbano. O material revisto e consultado consta das referências bibliográficas.
- Aprendizagem sobre a plataforma escolhida: A ferramenta escolhida para trabalharmos foi o Matlab, o qual possui *Toolboxes* sobre diversos temas, inclusive sobre lógica *fuzzy*.
- Implementação: Nesta fase, foram aplicados os conhecimentos adquiridos até então e desenvolvido o “protótipo de controle *fuzzy* de trânsito” (PCFT). Aqui foram dimensionados os valores para cada sistema analisado.
- Execução de testes e simulações: Desenvolvido o protótipo, executamos os testes para avaliação do PCFT.

Realizadas todas estas etapas, foi desenvolvida esta dissertação de mestrado ao qual tratamos de vários assuntos relacionados ao controle de trânsito urbano com a finalidade de podermos possuir referências bibliográficas e teóricas suficientes para desenvolver o protótipo que se almejava.

Para isto, desenvolvemos primeiramente um levantamento no capítulo 2 sobre o tema controle de tráfego, introduzindo assim uma visão geral sobre o mesmo, proporcionando um conhecimento sobre o problema atual do trânsito urbano, a terminologia empregada para se tratar sobre o assunto e, além disso, algumas definições em relação a interseções isoladas e tipos de controle de tráfego.

O capítulo 3 também aborda o tema de controle de tráfego, porém de uma maneira mais técnica e específica. Realizamos um levantamento bibliográfico sobre controle de tráfego, executando uma análise mais aprofundada sobre o tema interseções isoladas, definindo o problema das filas, onde foi demonstrada a fórmula de Webster [10] para o atraso e dois métodos

de resolução de cálculo de tempo de verde para semáforo, definindo assim a temporização de controladores de trânsito com tempo fixo.

O quarto capítulo desta dissertação foi dedicado exclusivamente para tratar sobre o assunto lógica *fuzzy*. Observamos aqui que um controle *fuzzy* para se executar depende de três etapas. A primeira é basicamente receber os valores de entrada para o sistema, sendo chamados de entradas *crisp*. Este valor é *fuzzificado* tornando-se um valor *fuzzy*. Depois disso ocorre a aplicação das regras resultando um valor de saída para cada entrada. Por fim, este valor é *defuzzificado*, sendo transformado de *fuzzy* para *crisp*, sendo que o resultado será aplicado no processo que está sendo controlado.

No capítulo 5 foi descrito o Protótipo de Controle *Fuzzy* de Trânsito (PCFT), onde apresentamos suas características de funcionamento, as três interseções as quais este analisou e como foram definidas as funções de pertinências *fuzzy*. Duas das interseções que foram analisadas foram com dados de fluxo de veículos fictícios e a terceira (sistema 3) foi retirada da bibliografia [16] e representou um caso real de uma interseção, demonstrando uma aplicação diferenciada. Também foi apresentado para todos os sistemas analisados, um modelo de controle *fuzzy* com tempo fixos, variando o ciclo dos semáforos conforme o período do dia.

O sexto capítulo complementou o anterior por demonstrar os resultados do PCFT em simulações. Para o sistema 1, comparamos os tempos de ciclo calculados para a interseção através do método de Webster [10], com os valores fornecidos pelo protótipo, onde podemos concluir que para uma situação máxima de fluxo, os resultados se equivaliam, porém se comparados em aplicação prática, podemos concluir que o PCFT proporciona menos atraso aos condutores de veículos por variar seu tempo de ciclo conforme a demanda de veículos. No sistema 2, foram realizadas simulações com os fluxos de veículos dados para esta interseção, onde verificamos uma diminuição nos tempos de ciclo comparados ao sistema 1, devido ao formato físico da interseção. No caso do sistema real (sistema 3), foi efetuado um comparativo entre os valores que estão sendo empregados hoje na interseção e os proporcionados pelo PCFT. Concluímos que tínhamos bons valores de simulação, sendo que o protótipo proporciona menor atraso para os condutores por variar sempre seu tempo de verde nos semáforos conforme o fluxo de

veículos. O sistema 3 possui sistema de controle de tempo pré-fixado. Também foram realizadas simulações para os três sistemas com tempo fixo, o qual podemos concluir que todos sistemas controlados conseguiram realizar variação do tempo de ciclo dos semáforos na mesma proporção que aumentava ou diminuía o fluxo de veículos nas avenidas.

7.3 Conclusões Gerais

A expectativa de contribuição prática da dissertação é o seu uso por pessoas e entidades ligadas profissionalmente a problemas de controle de trânsito, explorando a possibilidade de melhoria das soluções obtidas através do emprego de métodos de controle baseados em lógica *fuzzy*.

Podemos observar que a utilização da lógica *fuzzy* em sistemas de controle de trânsito pode vir a ser uma grande alternativa, visto os resultados que observamos em análise através dos três sistemas propostos ao PCFT. A grande vantagem de um sistema *fuzzy* é a sua simplicidade de execução. Seu dimensionamento, se existir um pré-conhecimento sobre o fluxo de veículos nas avenidas, é de fácil execução, sendo que se houver erros de projeto, sua alteração é muito simples, pois basta modificar os valores das funções de pertinência ou o valor de *range* dos conjuntos *fuzzy*. Com sistemas *fuzzy*, os controles se tornam mais simples e intuitivos.

É importante lembrar que, independente do método de controle de trânsito que se pretende adotar, é muito importante possuir um bom projeto da interseção. Isto pode contribuir muito para a diminuição do atraso dos condutores dos veículos, que é o principal objetivo de um controle de tráfego urbano.

Este modelo *fuzzy* proposto através do PCFT nos determina uma vantajosa alternativa, porém é preciso desenvolvê-la ainda mais, colocando esta em uma situação prática, controlando semáforos em interseção. Com isto poderíamos torna-lo um método comercial, podendo ser aplicado em várias cidades com problemas de engarrafamentos ou tráfegos intensos de veículos.

7.4 Trabalhos Futuros

Com tudo, é possível prever alguns estudos futuros como forma de continuação deste trabalho. O protótipo poderia possuir um sistema realimentado que fornecesse valores de entrada automaticamente para o controle *fuzzy*. Isto tornaria o PCFT mais atrativo além de mais ilustrativo. O uso do Simulink do software *Matlab®* poderia ser a alternativa para resolver este caso. Outro estudo seria colocar o protótipo em uma situação real, controlando na prática uma interseção, conforme já comentado. Isto poderia ser feito através da parceria com a iniciativa privada e órgãos públicos, relatando os resultados obtidos. Por fim, poderíamos ainda estabelecer um controle *fuzzy* de trânsito não somente para uma interseção, mas para uma artéria de avenida inteira, controlando várias interseções, ou até um controle de trânsito de uma determinada região de uma cidade.

De forma geral, espera-se que este trabalho realmente proporcione um novo modelo de se pensar em controle de trânsito, pois a lógica *fuzzy* é uma ótima ferramenta que proporciona agilidade e confiabilidade em execução de controles.

Capítulo 8: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] RICH, Elaine, *Inteligência Artificial* / Elaine Rich, Kevin Knight; tradução Maria Cláudia Santos Ribeiro Ratto – São Paulo : Makron Books, 1993.
- [2] YAGER, Ronald e FILEV, Dimitar - Wiley Interscience, *Essentials of Fuzzy Modeling and Control*. NY, 1994.
- [3] ZURADA, J., MARKS II, R., ROBINSON, C. (Eds), *Computational Intelligence: Imitating Life* - IEEE Press, NY, 1994.
- [4] KOSKO, Bart, *Neural Networks and Fuzzy Systems*. Prentice Hall, New Jersey, 1992.
- [5] ARABSHAHI, Payman, *Pointer Adaptation and Pruning of Min-Max Fuzzy Inference and Estimation*. Dept. of Electrical Eng. University of Washington – & Robert J. Marks II - Dept. of Electrical & Computer Eng. University of New Mexico.
- [6] WAN, Eric A., *Control Systems: Classical, Neural, and Fuzzy*. Oregon Graduate Institute, Lecture Notes – 1998.
- [7] BORGES, Paulo Sérgio da Silva. A Model of Strategy Games Basead on the Paradigm of the Iterated Prisoner's Dilemma Employing Fuzzy Logic. UFSC. Florianópolis, SC, 1996.
- [8] MATSUMOTO, Élia Yathie, MATLAB6: Fundamentos de Programação. São Paulo, Ed. Érica, 2001.
- [9] WILSHIRE, R., Black, R., Grochoske, R., and Higinbotham, J., *Traffic Control Systems Handbook – Revised Edition*.
- [10] WEBSTER, F.V., Traffic Signal Settings. Road Research Laboratory Technical Paper N° 39. London, 1958.
- [11] WOHL, M. and MARTIN, B. V., *Traffic Systems Analysis For Engineers and Planners*. McGraw-Hill Book Company. N.Y. 1967.
- [12] FRANÇOSO, Maria Teresa, estudo Sobre Semáforos Isolados com tempos Fixos. Dissertação de Mestrado. USP, São Carlos, 1990.
- [13] STERN, Y., Lilenbaum, M., ROUSSEAU, L. C., PERLIGEIRO, C. A., NETTO, A. S. L., *Um Estudo Sobre Trafego Sincronização de Sinais*. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, 1969.
- [14] BRITO, Ronei Mascarenhas de, Desenvolvimento de um Simulador Para Análise e Projeto de Sistemas de Controle de Tráfego em Malha Fechada, Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Elétrica. UFSC. Florianópolis, 1998.
- [15] PIETRANTONIO, Hugo e Bonetti Jr, Wagner, A Validation Study on the Use of Traffic Actuated Signal Control and HCM-basead Performance Evaluation Procedures in Brazil. Paper, São Paulo, USP, 2001.

- [16] OLSON, P.L. e ROTHERY, R.W., Driver Response to the Amber Phase of Traffic Signals. Traffic Engineering, 1962.
- [17] GOELZER, Lúcio, Teoria das Filas. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1993.
- [18] EDIE, L.C., Traffic Delays at Toll Booths, J. Operations Research, Vol. 2, 1954.

Bibliografia Retirada da Internet:

- [19] http://cepanet01.cepa.com.br/ccjb/sist_esp.htm (Referente a Sistema Especialista - 12/09/2001).
- [20] <http://www.cce.ufpr.br/~hamilton/iaed/iaed.htm> (Referente a Sistema Especialista - 12/09/2001).
- [21] <http://www.din.uem.br/ia/especialistas/> (Referente a Sistema Especialista – 12/09/2001).
- [22] <http://www.unisul.rct-sc.br/pessoais/bussolo/ia.htm> (Referente a Sistema Especialista - 16/09/2001).
- [23] – <http://sites.uol.com.br/bigbob/fuzzy> (Referente a Lógica Fuzzy - 16/09/2001)
- [24] <http://www.abrancet.com.br/stats> (Referente a Estatísticas de Tráfego – 08/10/2001).
- [25] <http://www.pbh.gov.br/siga/transito> (Referente a Controle de Trânsito – 08/10/2001).

Outras Bibliografias utilizadas

- [26] SOFTWARE UN-FUZZY 1.1, Universidade Nacional da Colombia (Oscar G. Duarte), 1998.
- [27] SOFTWARE MOTOROLA, *Programa de Educação Logica Fuzzy*, Austin, Texas, 1994.
- [28] Material de aula do Professor Paulo S. S. Borges referente a disciplina de Inteligência Artificial do curso de Mestrado em Ciência da Computação da UFSC.
- [29] FUZZY LOGIC TOOLBOX USER'S GUIDE, Copyright 1995-1998 by The Math Works, Inc.

ANEXOS

ANEXO 1: DADOS DE ANÁLISE PARA SISTEMA 1

A.1.1 Fluxo de Veículos do Sistema 1

Hora	Avenida 1 (V/hora)	Veic/ min	Avenida 2 (V/hora)	Veic/ min	Avenida 3 (V/hora)	Veic/ min	Avenida 4 (V/hora)	Veic/ min
01:00	350	6	360	6	300	5	260	4
02:00	210	4	190	3	160	3	150	3
03:00	160	3	90	2	120	2	120	2
04:00	80	1	80	1	90	2	95	2
05:00	100	2	80	1	110	2	100	2
06:00	280	5	90	2	180	3	120	2
07:00	480	8	300	5	550	9	210	4
08:00	1100	18	700	12	1000	17	640	11
09:00	680	11	630	11	900	15	610	10
10:00	660	11	600	10	710	12	590	10
11:00	640	11	590	10	630	11	600	10
12:00	670	11	610	10	650	11	630	11
13:00	680	11	610	10	620	10	590	10
14:00	710	12	620	10	650	11	600	10
15:00	830	14	660	11	800	13	600	10
16:00	890	15	810	14	880	15	650	11
17:00	1100	18	900	15	1080	18	880	15
18:00	1200	20	960	16	1100	18	890	15
19:00	1000	17	860	14	880	15	800	13
20:00	850	14	590	10	600	10	520	9
21:00	800	13	500	8	580	10	440	7
22:00	600	10	480	8	520	9	400	7
23:00	580	10	360	6	400	7	350	6
00:00	450	8	320	5	380	6	280	5

Tabela A.1 – Fluxos de Veículos para Sistema 1

A.1.2 Funções de Pertinência Para Sistema 1:

Simulação Com Sensor

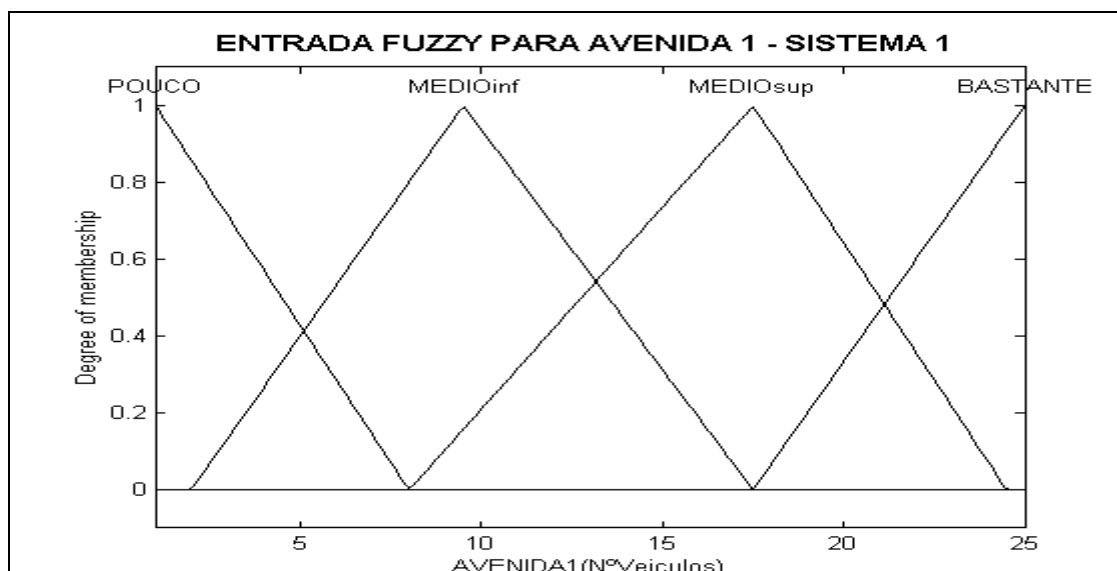


Fig. A.1 –Funções de Pertinência de Entrada para a Avenida 1 do Sistema 1

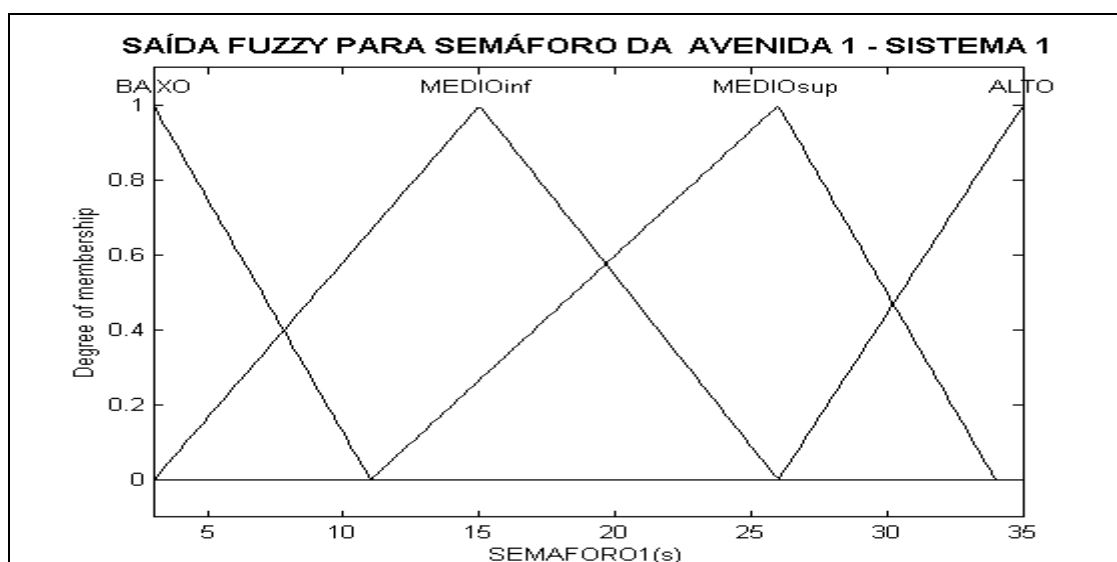


Fig. A.2 – Funções de Pertinência de Saída para o Avenida 1 do Sistema 1

A.1.3 Funções de Pertinência Para Sistema 1:

Simulação Com Tempo Fixo

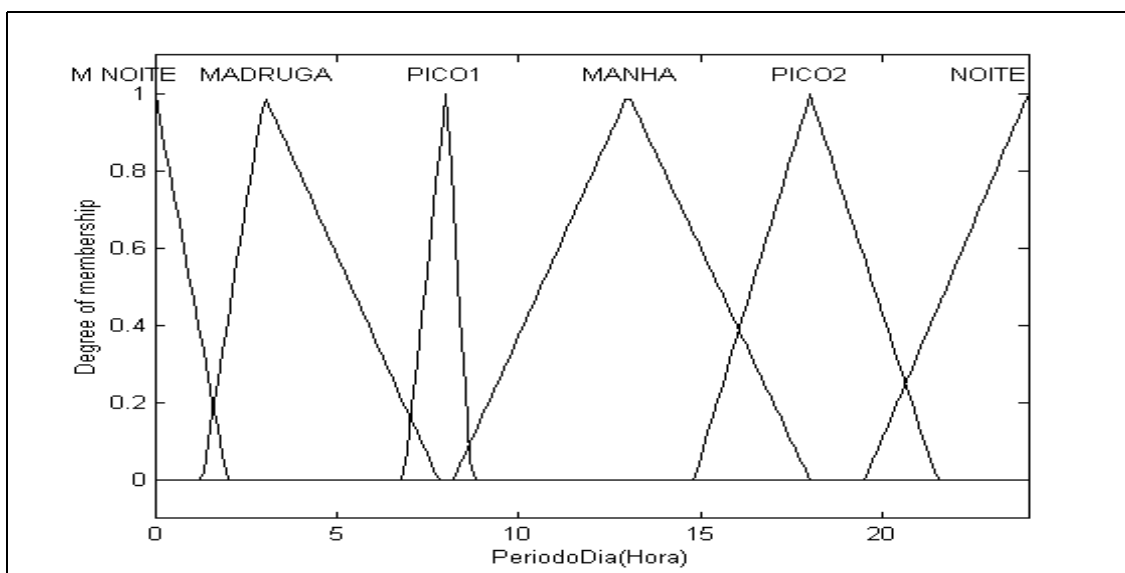


Fig. A.3 – Função de Pertinência para o Período do Dia para Controle com Tempo Fixo

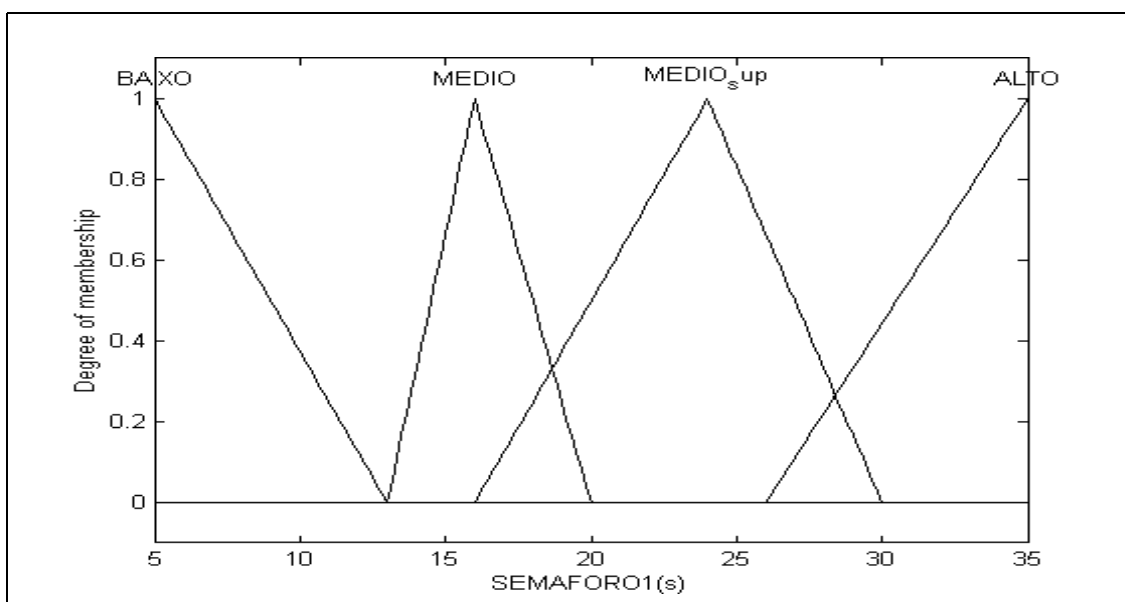


Fig. A.4 – Função de Pertinência para a Avenida 1 do Sistema 1 com Tempo Fixo

ANEXO 2: DADOS DE ANÁLISE PARA SISTEMA 2

A.2.1 Fluxo de Veículos do Sistema 2

	AVENIDA 1		AVENIDA 4		AVENIDA 2		AVENIDA 3	
Hora	Semáforo1	Semáforo2	Semáforo3	Semáforo4	Semáforo5	Semáforo6	Semáforo7	Semáforo8
01:00	160	460	80	250	170	490	80	280
02:00	110	320	30	110	145	400	50	160
03:00	95	280	25	80	120	330	40	120
04:00	70	210	20	60	110	340	30	90
05:00	75	220	20	70	110	310	35	110
06:00	150	410	40	130	175	500	60	180
07:00	215	620	135	440	245	700	170	550
08:00	450	1300	270	880	445	1250	310	1000
09:00	300	830	190	630	310	890	280	900
10:00	270	790	180	590	300	840	215	710
11:00	260	770	160	510	250	695	195	630
12:00	280	800	170	560	270	750	200	650
13:00	280	820	160	520	275	780	195	620
14:00	285	850	165	550	290	840	200	650
15:00	340	960	210	680	315	900	250	800
16:00	360	1020	220	720	390	1100	270	880
17:00	390	1300	260	850	480	1380	330	1080
18:00	515	1450	295	950	630	1600	335	1100
19:00	420	1250	280	900	530	1450	270	880
20:00	340	1000	190	620	450	1150	190	600
21:00	330	940	150	490	340	980	180	580
22:00	270	750	120	380	240	690	160	520
23:00	230	680	100	330	215	600	125	400
00:00	195	580	85	280	180	500	100	320

Tabela A.2 - Fluxo de Veículos para o Sistema 2

A.2.2 Funções de Pertinência Para Sistema 2:

Simulação Com Sensor

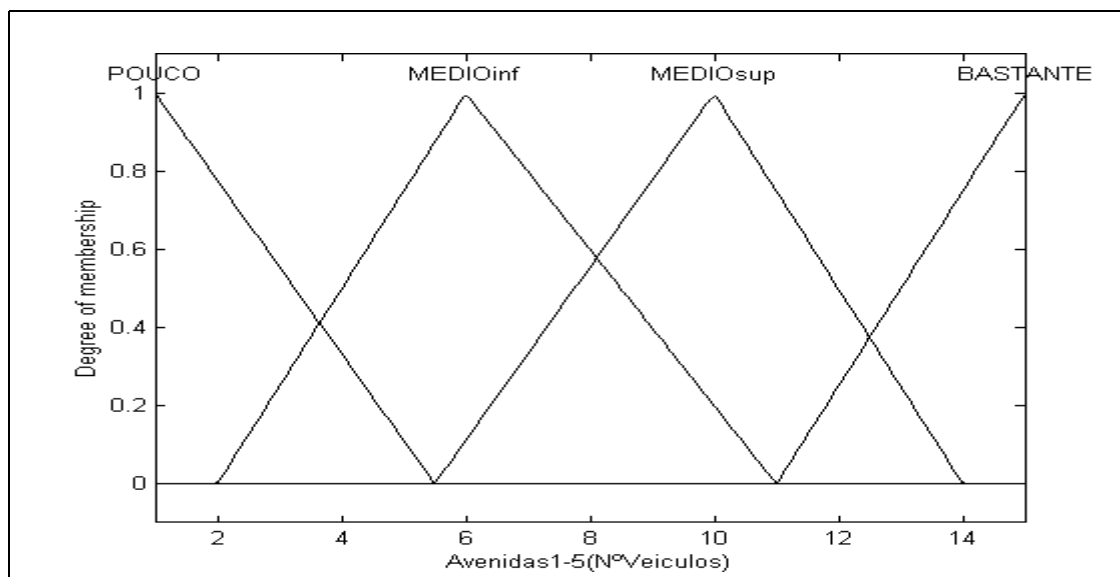


Fig. A.5 – Funções de Pertinência de Entrada para a Avenida 1 e Avenida 2, Representando os Sensores 1 e 5 do Sistema 2

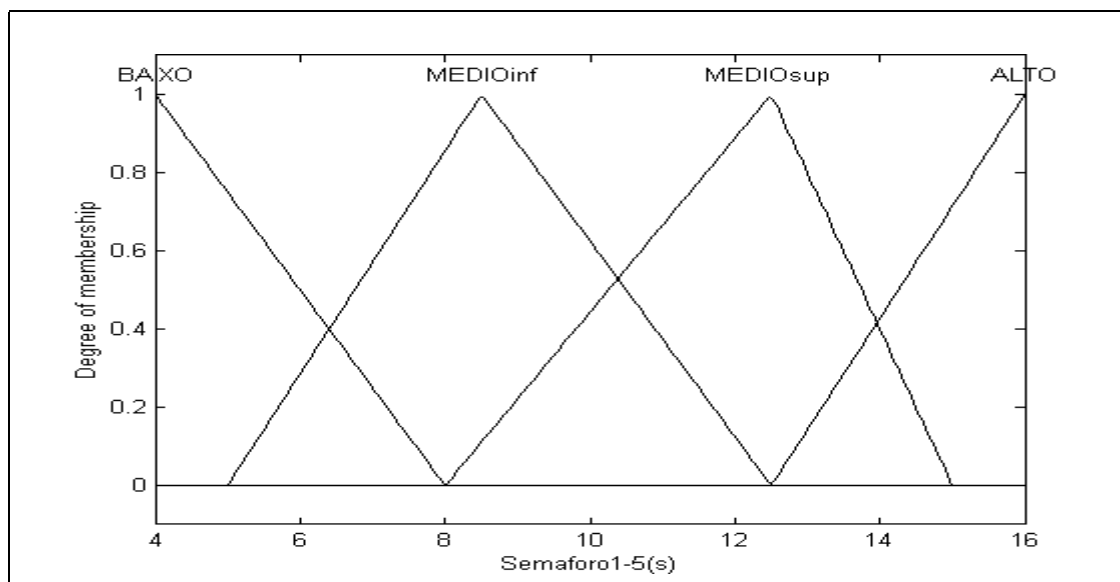


Fig. A.6 – Funções de Pertinência de Saída do Semáforo 1 e 5 do Sistema 2

A.2.3 Funções de Pertinência Para Sistema 2:

Simulação Com Tempo Fixo

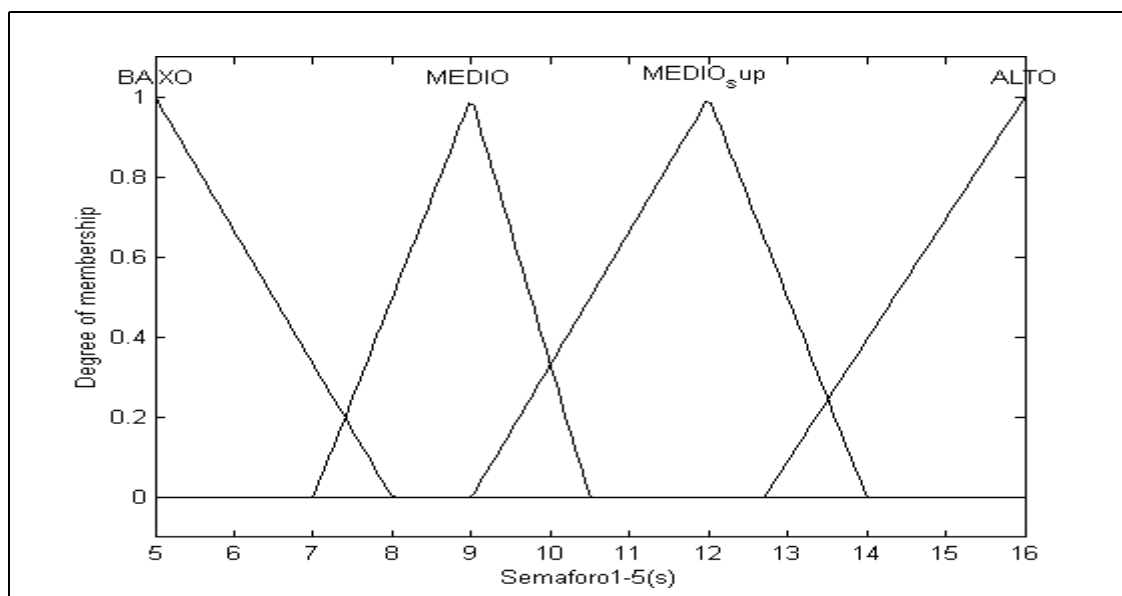


Fig. A.7 - Funções de Pertinência de Saída do Semáforo 1 e 5 do Sistema 2 com Tempo Fixo

ANEXO 3: DADOS DE ANÁLISE PARA SISTEMA 3

A.3.1 Fluxo de Veículos do Sistema 3

Hora	WP (V/H)	WP (V/min)	JL (V/H)	JL (V/min)	MC (V/H)	MC (V/min)	SEM.1-2 (s)	SEM. 3 (s)	CICLO
							Tempo Fixo	Tempo Fixo	Tempo Fixo
06:30	2769	46	2100	35	976	16	33	17	50
07:00	2769	46	2100	35	976	16	53	22	75
08:00	2769	46	2100	35	976	16	53	22	75
09:00	2237	37	1619	27	812	14	33	17	50
10:00	2237	37	1619	27	812	14	33	17	50
11:00	2529	42	1486	25	947	16	40	20	60
12:00	2529	42	1486	25	947	16	40	20	60
13:00	2529	42	1486	25	947	16	40	20	60
14:00	2529	42	1486	25	947	16	40	20	60
14:30	1986	33	1252	21	800	13	33	22	55
15:00	1986	33	1252	21	800	13	33	22	55
16:00	3435	57	2215	37	1051	18	56	24	80
16:45	3435	57	2215	37	1051	18	70	25	95
17:00	3435	57	2215	37	1051	18	70	25	95
18:00	3435	57	2215	37	1051	18	70	25	95
19:00	3435	57	2215	37	1051	18	70	25	95
19:30	3435	57	2215	37	1051	18	51	29	80
20:00	1370	23	1262	21	463	8	33	17	50
21:00	1170	20	953	16	713	12	30	15	45
22:00	1170	20	953	16	713	12	30	15	45
23:00	1170	20	953	16	713	12	30	15	45
00:00	1170	20	953	16	713	12	30	15	45

Tabela A.3 – Fluxo de Veículos para o Sistema 3

A.3.2 Funções de Pertinência Para Sistema 3:

Simulação Com Sensor

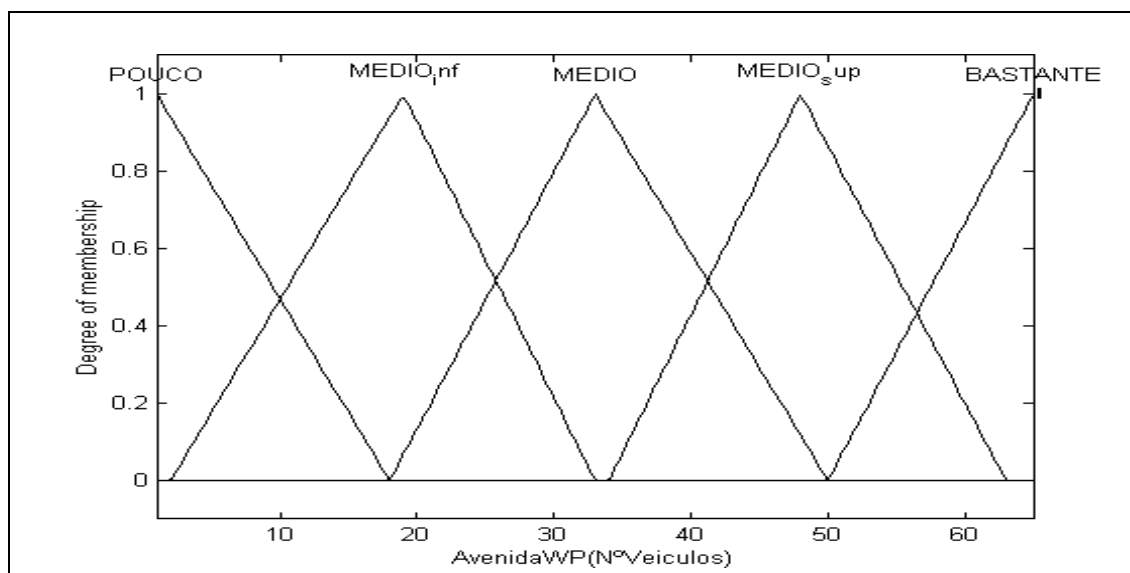


Fig. A.8 – Funções de Pertinência de Entrada para a Av. Waldemar Pascoal do Sistema 3

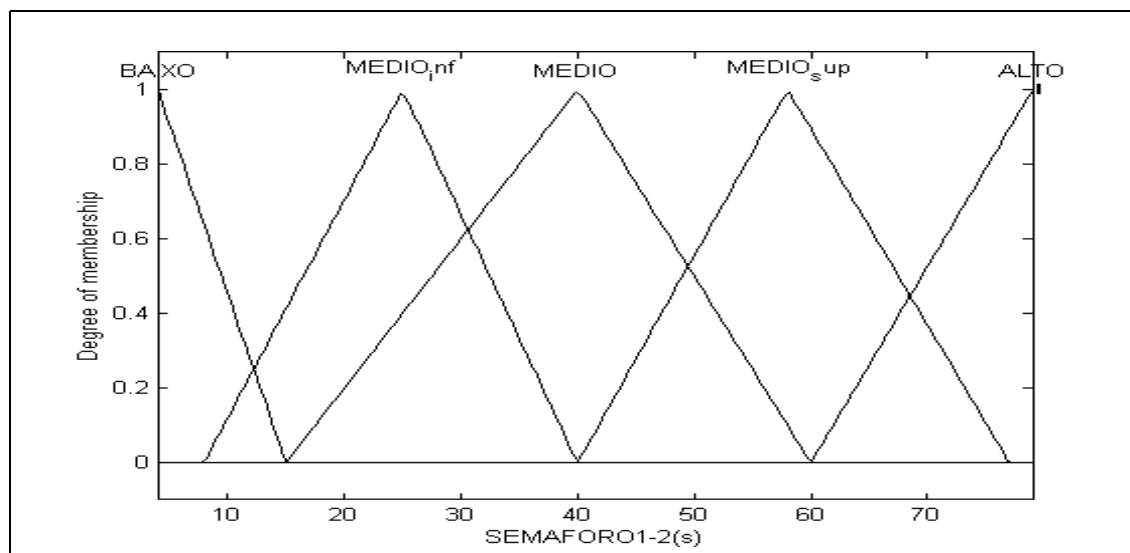


Fig. A.9 – Funções de Pertinência de Saída para o Semáforo 1-2 do Sistema 3

A.3.3 Funções de Pertinência Para Sistema 3:

Simulação com Tempo Fixo

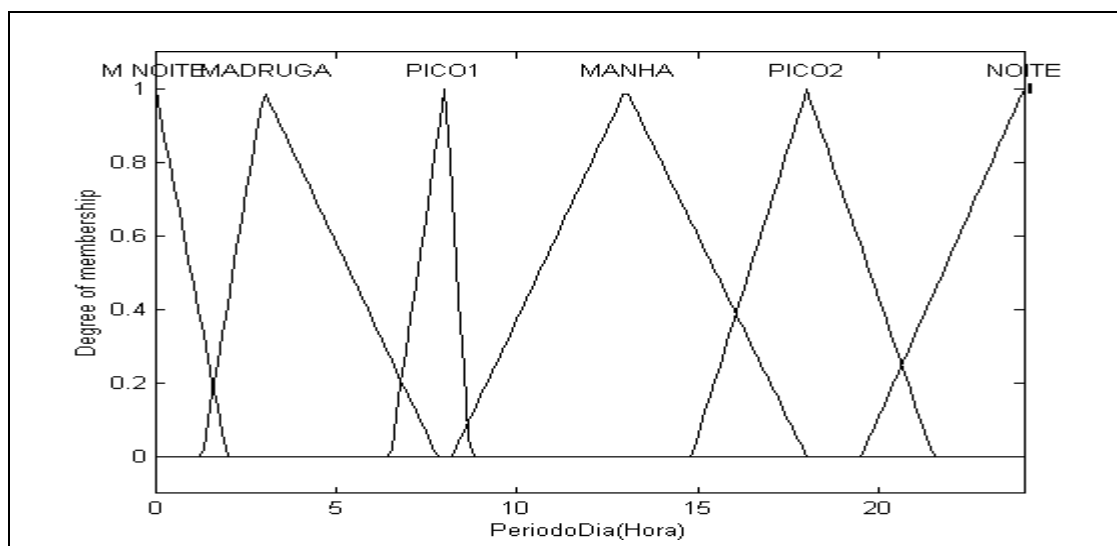


Fig. A.10 – Função de Pertinência para o Período do Dia para Controle com Tempo Fixo

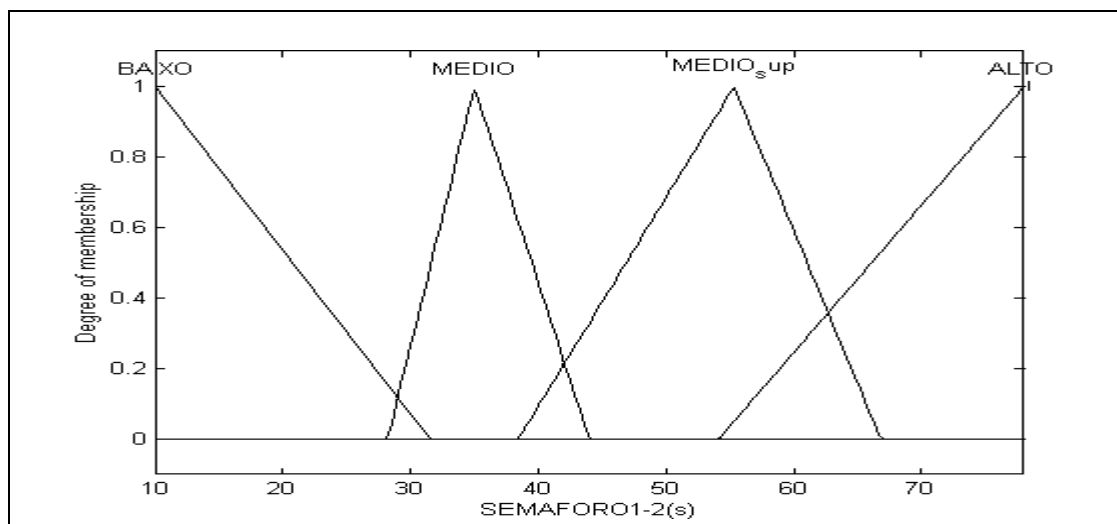
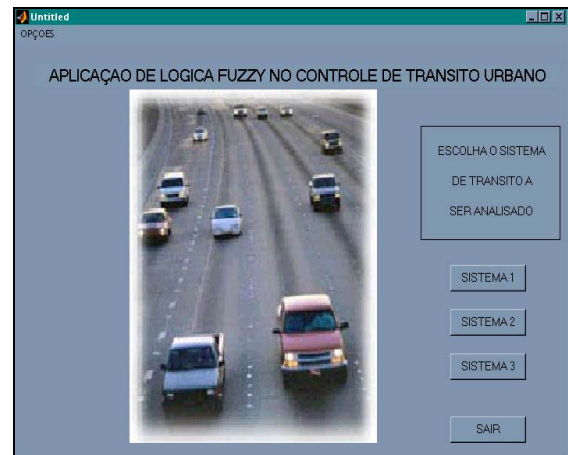


Fig. A.11 - Função de Pertinência de Saída para o Semáforo 1-2 do Sistema 3 com Tempo Fixo

ANEXO 4: INTERFACE COM USUÁRIO DO PCFT



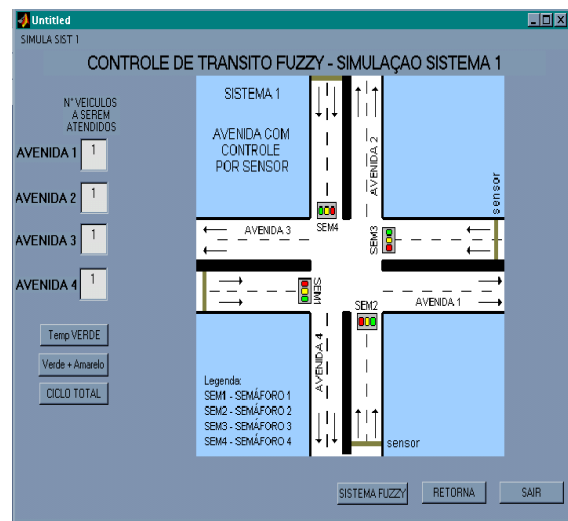
Início do PCFT



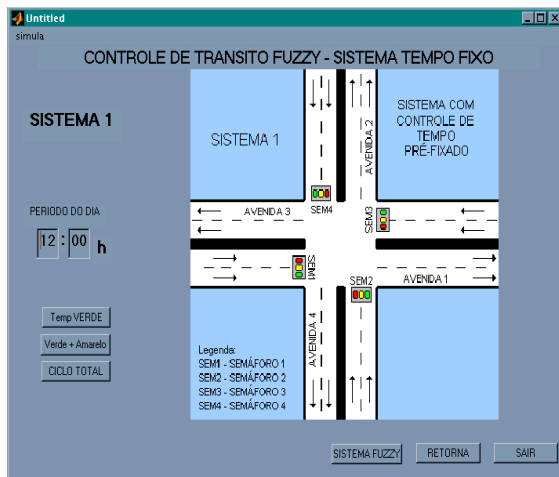
Escolha do Sistema a ser Analisado



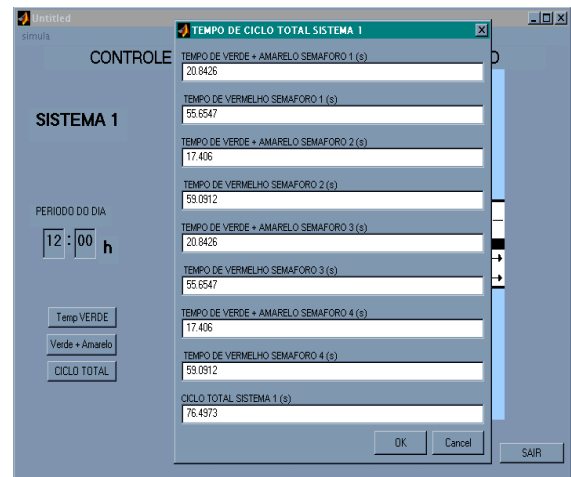
Sistema 1



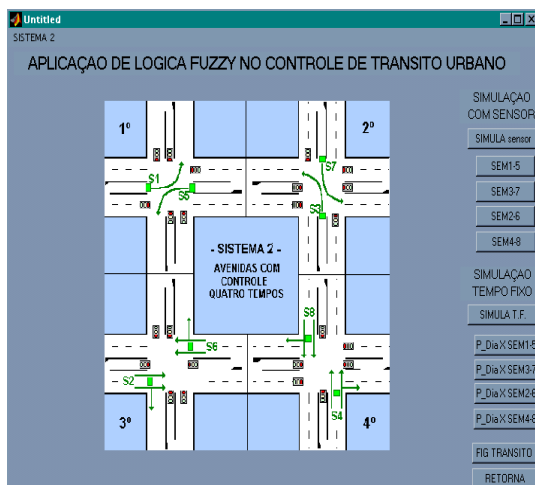
Simulação do Sistema 1 com Sensor



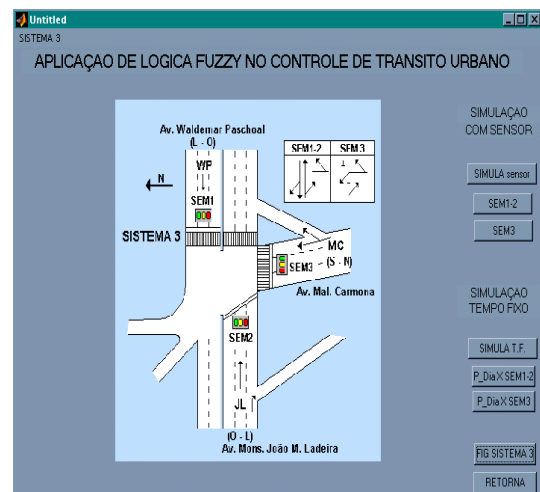
Simulação do Sist. 1 com Tempo Fixo



Simulação com Tempo Fixo



Sistema 2



Sistema 3